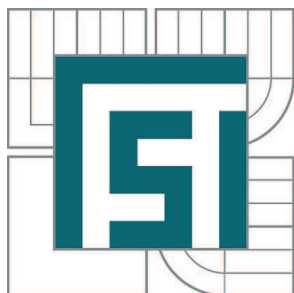


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

HARDWAROVÉ A SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ DIAGNOSTIKY A BEZPEČNOSTI PROVOZU ROBOTICKÉHO MANIPULÁTORU

HARDWARE AND SOFTWARE SOLUTION FOR DIAGNOSTICS AND SAFETY OPERATION FOR
ROBOTIC MANIPULATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DAVID KLIMEŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ROBERT GREPL, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. David Klimeš

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Hardwarové a softwarové řešení diagnostiky a bezpečnosti provozu robotického manipulátoru

v anglickém jazyce:

Hardware and software solution for diagnostics and safety operation for robotic manipulator

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat návrhem konstrukce, modelováním a řízením výukového laboratorního modelu průmyslového manipulátoru se třemi stupni volnosti (3 rotace). Práce bude řešena v týmu. Diplomant se zaměří především na realizaci výkonové a řídicí elektroniky s důrazem na zajištění diagnostiky sensorického systému a bezpečnosti provozu manipulátoru.

Cíle diplomové práce:

- 1) Specifikace kinematiky a dynamiky modelové úlohy pro manipulátor. Návrh kinematického a dynamického modelu v prostředí SimMechanics. Návrh pohonů.
- 2) Hardwarové řešení výkonové elektroniky pro řízení pohonů manipulátoru.
- 3) Osazení robotu dodatečnými sensory pro zajištění redundantního monitorování jeho stavu (mechanické a optické spínače, akcelerometry, sensory vzdálenosti).
- 4) Návrh nezávislé vyhodnocovací elektroniky pro detekci chybového chování manipulátoru a následné vypnutí napájení motorů.
- 5) Softwarové řešení diagnostiky stavu robotu s využitím sensorů a modelu manipulátoru.
- 6) Řízení pohybu manipulátoru podle dat z kamery (vypracování ukázkové testovací úlohy).

Seznam odborné literatury:

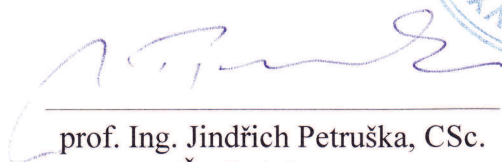
- Valášek, M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT 1995
- Grepl, R.: Modelování mechatronických systémů v Matlab/SimMechanics, BEN, 2007
- Noskiewicz: Modelování a identifikace systémů
- Janíček, P., Ondráček, E.: Řešení problémů modelováním, skriptum VUT Brno, 1998
- Horáček, P.: Systémy a modely, ČVUT 1999

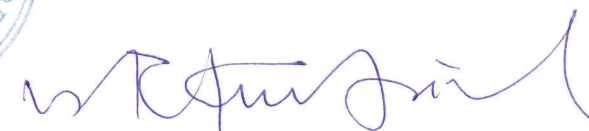
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 19.11.2012




prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a použitím manipulátoru se třemi stupni volnosti. Hlavním cílem je vytvoření vhodné edukační platformy.

Úvodní část je věnována stanovení cílů a metodě návrhu založené na kinematicém a dynamickém modelu.

V další kapitole je navržena a realizována elektronika potřebná pro bezpečný a spolehlivý provoz manipulátoru jako výukové platformy.

Poslední část práce popisuje použití sestaveného manipulátoru společně s doplňkovou senzorikou a kamerovým systémem. Výsledkem je pak několik ukázkových úloh použití manipulátoru.

Abstract

This thesis deals with design and use of manipulator with three degrees of freedom. The main objective is to develop appropriate educational platform.

Firstly, it deals with definition of the goals and design method based on kinematic and dynamic models.

Another section is dedicated to the design and implementation of the electronics needed for the safe and reliable operation of the manipulator as a educational platform.

The last part deals with the use of manipulator together with additional sensors as well as vision system. The result is a demonstration of tasks use of manipulator. Example of use of this educational platform is implemented in a few demonstration tasks.

Poděkování

Zde bych rád poděkoval doc. Ing. Robertu Greplovi Ph.D., který byl vedoucím této diplomové práce. Jeho rady, připomínky a vedení práce bylo pro mě velmi cenné. Také bych chtěl poděkovat celému kolektivu mechatronické laboratoře za dobrou a inspirativní spolupráci při řešení projektu.

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a pod vedením vedoucího DP.

David Klimeš, Brno, 2013

Obsah

1	Úvod	12
2	Formulace cílů a metody řešení	13
2.1	Projekt výukové platformy manipulátoru	13
2.2	Specifikace cílového využití manipulátoru v rámci projektu	13
2.3	Dílčí cíle projektu	14
2.4	Cíle diplomové práce	14
2.5	Struktura projektu - pracovní tým	15
3	Základní návrh manipulátoru	16
3.1	Stanovení cílů, požadavků na návrh manipulátoru	16
3.2	Vymezení pracovního prostoru manipulátoru	18
3.3	Jednoduchý model manipulátoru	19
3.3.1	Kinematický model	19
3.3.2	Dynamický model	25
3.4	Výběr pohonů	29
3.4.1	Pohon P1 a P2	29
3.4.2	Pohon P3	29
4	Návrh a realizace elektroniky	30
4.1	Celkové zapojení manipulátoru	30
4.2	Konektorová deska	32
4.2.1	Specifikace realizované konektorové desky	33
4.3	Ochranná elektronika	34
4.3.1	Funkce ochranné logiky	35
4.3.2	Sestavení logické funkce	36
4.3.3	Realizace ochranné elektroniky	36
4.3.4	Specifikace zrealizované ochranné elektroniky	38
4.4	Výkonová elektronika	39

5	Bezpečný a spolehlivý provoz manipulátoru	40
5.1	Real-Time a prostředí Simulink	40
5.1.1	Použité prvky z RTWT toolboxu	41
5.2	Určování absolutní polohy pohonů	41
5.2.1	Využití indexovacích spínačů	41
5.2.2	Využití akcelerometru	43
5.3	Knihovna pro snadné a bezpečné řízení manipulátoru v prostředí Simulink	45
5.3.1	Jednotlivé části knihovny	46
6	Využití kamerového systému	49
6.1	Použitá kamera	49
6.1.1	Prostředí LabVIEW	50
6.1.2	Prostředí Vision Builder AI	50
6.1.3	Propojení kamery NI 1742 s řídicím PC	51
6.1.4	Postup zpracování a vyhodnocení obrazu	52
7	Vytvoření ukázkových úloh	53
7.1	Online kopírování trajektorie předmětu pohybem manipulátoru	53
7.1.1	Vytvoření aplikace pro zpracování obrazu	54
7.1.2	Aktualizace polohy koncového bodu manipulatoru	55
7.2	Snímání polohy koncového efektoru	55
7.2.1	Vytvoření aplikace pro zpracování obrazu	56
7.2.2	Vyhodnocení pozice koncového efektoru manipulátoru	57
8	Závěr	59
9	Literatura a odkazy	61
10	Seznam symbolů a zkratk	63
11	Přílohy	64

1 Úvod

V dnešní době je snahou co nejvíce automatizovat veškerou výrobu, ať již z důvodů ekonomických, nebo technologických. Proto se velmi rozšiřuje použití různých druhů průmyslových manipulátorů. Tyto manipulátory se často využívají pro přesouvání a polohování předmětů, pro provádění nejrůznějších technologických operací, nebo za účelem automatického testování výrobků. V těchto oblastech použití je lidský prvek nahrazován manipulátory, a to z důvodu opakující se činnosti nebo z potřeby vyvinout dostatečnou sílu. Jedná se také o aplikace, u kterých je nutné z technologického hlediska dosahovat dostatečně přesných pohybů, kterých člověk není schopen dlouhodobě dosahovat.

Z takto shrnutých faktů plyne, že znalosti problematiky návrhu a řízení robotických manipulátorů jsou v dnešní době velmi cenné. Je zřejmé, že samotný návrh takového manipulátoru je velmi komplexní záležitostí. Průmyslové manipulátory jsou relativně složitou elektromechanickou soustavou, jejíž návrh vyžaduje znalosti z oblasti mechaniky, modelování, návrhu konstrukce, elektroniky a aplikace vhodného řízení. Jedná se tedy o návrh typicky mechatronické soustavy.

Je tedy vhodné mít k dispozici platformu, na které lze demonstrovat jak samotný postup návrhu, tak i využití zrealizovaného manipulátoru. Využití by tato platforma našla v mnoha oblastech výuky mechatroniky. Jedná se např. o ukázkou využití kinematických a dynamických modelů, nebo o aplikaci jednoduchých, případně i pokročilých, metod řízení (založených na identifikovaném modelu manipulátoru).

Na rozdíl od komerčně vyráběných průmyslových manipulátorů by takto vytvořená výuková platforma měla poskytovat zjednodušený pohled na tuto komplexní problematiku. Realizovaná výuková platforma by měla umožňovat přístup k jednotlivým částem manipulátoru na té nejnižší úrovni. Návrh konstrukce a samotného řízení je tomuto proto přizpůsoben. Nejedná se proto o návrh manipulátoru, který by měl být konkurenceschopný komerčně vyráběným manipulátorům, ale jde především o ukázkou samotných principů a metod jako takových (využití senzorů, návrh řízení, atd.).

2 Formulace cílů a metody řešení

2.1 Projekt výukové platformy manipulátoru

Diplomová práce vychází z projektu „Platforma pro výuku modelování, identifikace a řízení dynamických soustav“ [1]. Cílem projektu je vytvoření výukové platformy pro identifikaci, simulaci a řízení tříosého manipulátoru podobného komerčně vyráběným průmyslovým manipulátorům. Základ bude tvořen elektromechanickým systémem, který bude sestavený z běžně dostupných komponentů tak, aby bylo dosaženo otevřenosti¹ vyvíjené platformy.

Jedním z hlavních požadavků byly nároky kladené na dynamiku manipulátoru. Navržená platforma manipulátoru by měla být schopná vykonávat takové pohyby, u kterých se začne projevovat značný vliv momentů setrvačnosti jednotlivých dílů.

Dalším cílem (vycházejícím z čistě edukačních cílů) byla možnost ukázky gravitačních sil, které také působí na jednotlivé části manipulátoru. Proto je nutné přizpůsobit konstrukci tak, aby bylo možné manipulátor volně svěsit do vertikální polohy (podobně jako závaží u kyvadla).

2.2 Specifikace cílového využití manipulátoru v rámci projektu

Základem pro návrh konstrukce je specifikace cílové oblasti činností, které budou dostatečně komplexní a atraktivní pro samotné studenty. Návrh manipulátoru byl proto motivovaný realizováním aplikace psaní na tabletu koncovým efektozem manipulátoru. Tím není vyloučeno to, že by platforma manipulátoru nemohla plnit „klasické“ manipulační funkce, kdy bude schopná uchopovat a přemísťovat různé předměty. Požadavky na návrh proto vychází z těchto možných cílových aplikací.

¹v tom smyslu, že platforma bude z komponentů, které lze různě modifikovat a na kterých bude dobře vidět jejich funkce

2.3 Dílčí cíle projektu

- Návrh základních parametrů na základě vytvořených modelů manipulátoru (vycházejících ze specifikací cílových úloh).
- Návrh a výroba konstrukčních dílů manipulátoru.
- Návrh a realizace výkonové a řídicí elektroniky.
- Identifikace jednotlivých parametrů manipulátoru. Sestavení modelu s reálnými parametry (podle skutečné konstrukce).
- Návrh regulátorů: PID regulátor, feedforward řízení.
- Vytvoření ukázkových úloh, které využívají realizovaný manipulátor společně s doplňkovou sensorikou jako jsou akcelerometry a vision system.

2.4 Cíle diplomové práce

První částí diplomové práce je návrh základních parametrů manipulátoru (vhodná topologie, rozměry, potřebné výkony pohonů). Takto určené parametry by měly sloužit jako prvotní podklad pro navazující návrh samotné konstrukce manipulátoru.

Dalším bodem zadání je návrh a realizace veškeré elektroniky nezbytné pro provoz manipulátoru. Velký důraz má být kladen především na bezpečný a spolehlivý provoz manipulátoru, který má sloužit především jako výuková platforma. K tomuto účelu byla navržena ochranná elektronika, která má za cíl vyhodnocovat aktuální stav jednotlivých částí manipulátoru a případně omezit jeho pohyb. Z bezpečnostních důvodů by takto navržená elektronika měla pracovat zcela na hardwarové úrovni bez "běžícího" softwaru, protože ten je v mnoha případech zdrojem "chyb".

Jedním z cílových bodů diplomové práce je vytvoření ukázkových úloh využívajících samotný manipulátor a doplňkovou sensoriku s vision systémem. Tyto úlohy by měly sloužit jako demonstrace využití použité sensoriky. Takto navržené úlohy by měly být podkladem pro realizaci hlavní motivační úlohy, kterou je psaní na tabletu nebo na papíře s využitím koncového efektoru manipulátoru.

2.5 Struktura projektu - pracovní tým

V této části je uvedeno rozdělení zbylých dílčích úkolů projektu mezi jednotlivé členy pracovního týmu zabývajícího se návrhem a realizací manipulátoru.

Josef Vejlupek

Vedení týmu. Specifikace cílů projektu. Návrhy manipulátoru.

Tomáš Ripel

Tvorba 3D modelu. Návrh konstrukce manipulátoru. Výroba a sestavení mechanické části manipulátoru.

Michal Šuranský

Práce M. Šuranského [2] se zabývá identifikací manipulátoru a následně sestavováním dynamického a kinematického modelu. Tyto modely využívá při návrhu různých druhů řídicích struktur.

3 Základní návrh manipulátoru

Tato kapitola se bude zabývat základním návrhem manipulátoru. Výchozí bod návrhu je zadání projektu dynamického manipulátoru. Při návrhu je brán ohled na požadavek cílových aplikací manipulátoru. Návrh začíná stanovením základních pohybů, čímž se definují prvotní rozměry a samotná kinematika manipulátoru. Následně je takto navržená kinematika využita pro stanovení maximálních momentů působících na jednotlivé pohony navrhovaného manipulátoru. Z takto určených parametrů se vychází při výběru pohonů a ostatních komponentů.

3.1 Stanovení cílů, požadavků na návrh manipulátoru

Po bližším specifikování cílů projektu byla zvolena topologie manipulátoru se třemi rotačními vazbami (manipulátor typu RRR¹).

Shrnutí požadavků na návrh manipulátoru:

- **Požadavek na vysokou dynamiku pohybu** - měl by být znatelný vliv hmotnosti (tím i setrvačnosti) jednotlivých komponentů
- **Nesamosvornost jednotlivých pohonů** - manipulátor by se měl při vypnutí samovolně svésit do vertikální polohy vlivem gravitace
- **Schopnost psaní na dotykovém displeji tabletu** (velikosti přibližně 10 palců) - tím je přibližně definován pracovní prostor manipulátoru

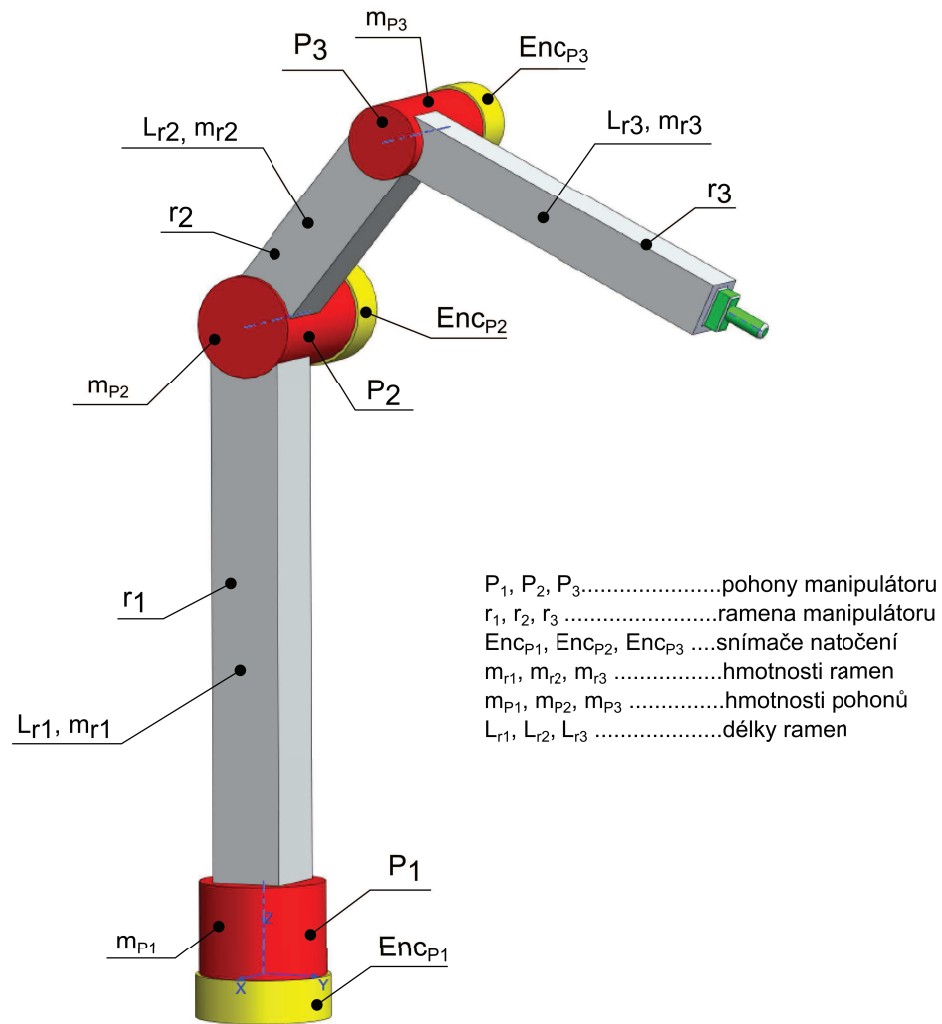
Na základě požadavků uvedených v předchozím odstavci byl navržen základní model manipulátoru. Prvotní představa mechanického uspořádání, přibližných rozměrů a rozložení pohonů pro vytvoření modelu v prostředí Simmechanics² je zobrazena na obr. 3.1. Jsou zde vidět tři rotační vazby spojující jednotlivá ramena a jejich vzájemné uspořádání.

Z požadavků na volné svěšení ramene manipulátoru vlivem gravitace plyne rozvržení délky jednotlivých ramen, kde ramena r_2 a r_3 musí být maximálně tak dlouhá jako je délka ramene r_1 .

Na základě cílových úloh bylo nutné navrhnout takové rozměry konstrukce, aby vhodným koncovým efektem bylo možné obsluhovat minimálně 10-ti palcový dotykový displej.

¹RRR-zkartka specifikuje druh jednotlivých vazeb - 3 rotace

²nástroj pro simulaci kinematických a dynamických modelů v prostředí Simulink



Obrázek 3.1: Prvotní návrh manipulátoru se třemi stupni volnosti.

Tabulka 3.1: Hodnoty parametrů.

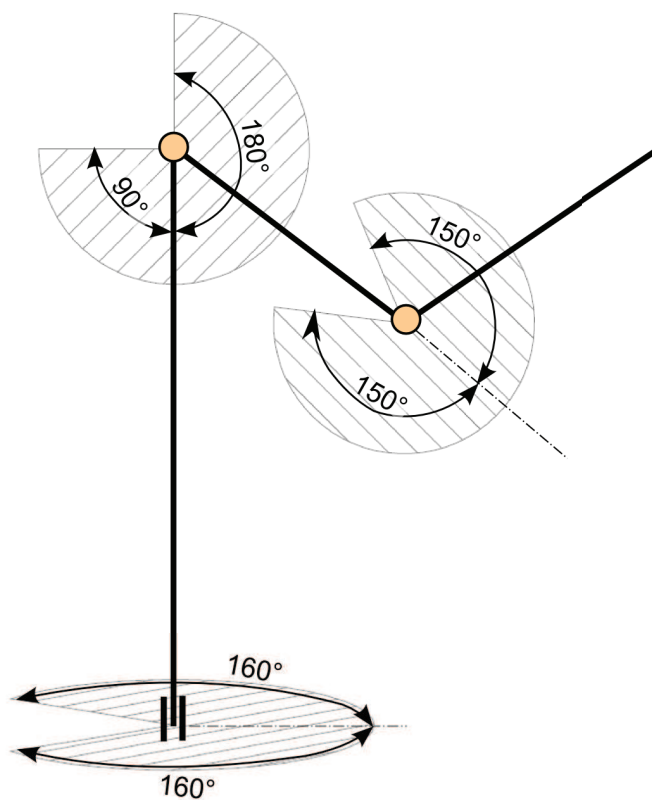
-	1	2	3
$m_r[kg]$	1,000	0,544	0,310
$m_P[kg]$	4,04	4,04	0,70
$L_r[m]$	0,4	0,18	0,22

3.2 Vymezení pracovního prostoru manipulátoru

Z vymezených pracovních činností, pro které je manipulátor koncipován, bylo nutné blíže specifikovat pracovní prostor. Z popisu cílového využití manipulátoru (viz. část 2.2) není nutné, aby jednotlivá ramena zajišťovala víceotáčkový pohyb kolem osy rotace jednotlivých pohonů. Naopak je žádoucí, aby pohyb byl omezen na předem definovaný pracovní prostor. Je tomu tak z důvodu jednoduššího vedení kabeláže z výkonových a senzorických částí manipulátoru.

Z konstrukčního hlediska byly proto určeny maximální možné úhly natočení jednotlivých ramen tak, aby bylo dosaženo zároveň i co největšího možného pracovního prostoru. Stanovený rozsah možného natočení jednotlivých pohonů je znázorněn na obr. 3.2.

Dodržení tohoto stanoveného rozsahu zajistí koncové spínače společně s ochrannou elektronikou (více v kapitole 4).



Obrázek 3.2: Vymezení pracovního prostoru manipulátoru.

3.3 Jednoduchý model manipulátoru

Pro vytvoření kinematického a následně dynamického modelu manipulátoru bylo využito prostředí Simmechanics, které je vhodné pro modelování kinematiky a dynamiky mechanických soustav jako je navrhovaný manipulátor. Topologie a celkové uspořádání modelu vychází z obrázku 3.1.

3.3.1 Kinematický model

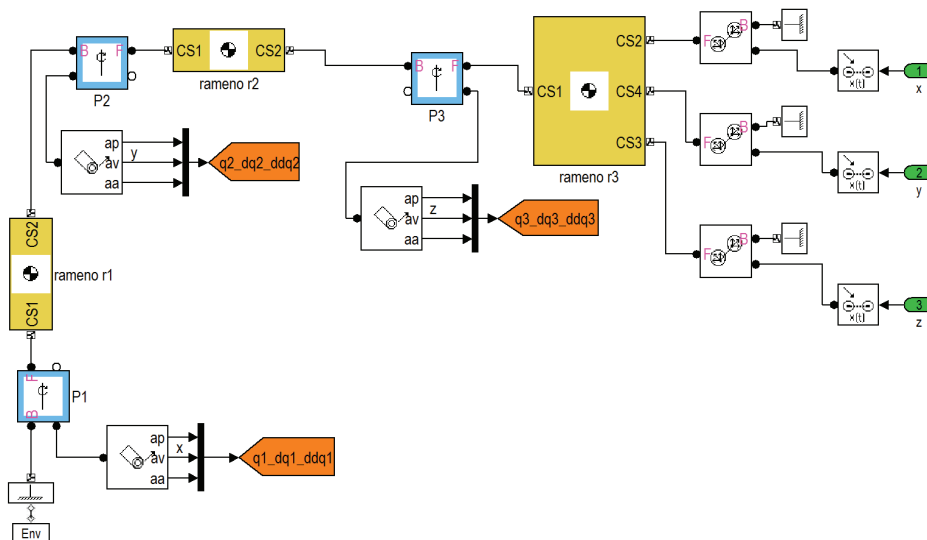
Pro základní představu toho, jakých rychlostí a zrychlení bude manipulátor dosahovat při plnění cílové úlohy, byl sestaven v prostředí Simmechanics kinematický model manipulátoru.

Sestavený kinematický model

Na níže uvedeném obr. 3.3 je blokové schéma kinematického modelu manipulátoru v Simmechanics. Základními prvky jsou tři rotační vazby P_1, P_2, P_3 (bloček Revolute-znázorněno modře) a tři tělesa-ramena r_1, r_2, r_3 (bloček Body-znázorněno žlutě).

Vstupem do kinematického modelu jsou veličiny zadané v kartézském souřadnicovém systému prostřednictvím bločku Drive Actuator (průběhy pozice, rychlost a zrychlení v osách x, y, z - jejich plánování se zabývá následující část kapitoly). Vstupy do kinematického modelu jsou pak znázorněny zeleně.

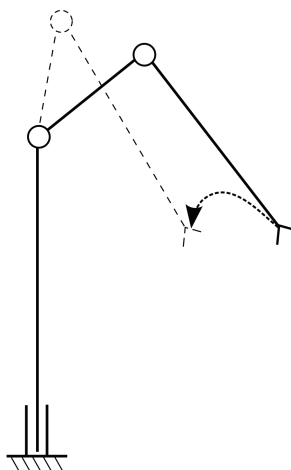
Výstupem jsou průběhy jednotlivých kloubových souřadnic, které se "snímají" pomocí bločku Joint Sensor (znázorněno oranžově).



Obrázek 3.3: Blokové schéma kinematického modelu v prostředí Simmechanics.

Plánování pohybu - trajektorie

Vstupem do výše definovaného kinematického modelu je vhodně definovaný pohyb manipulátoru. Plánování pohybu je realizováno v kartézském souřadnicovém systému tak, aby koncový bod manipulátoru simuloval psaní na tabletu. Trajektorie je plánována pouze v ose x a y . Pro účely simulace tohoto pohybu byla v prostředí Simmechanics vytvořena úloha inverzní kinematiky. Výsledkem této úlohy je pak pohyb definovaný v kloubových souřadnicích pro použití v modelu dynamiky.



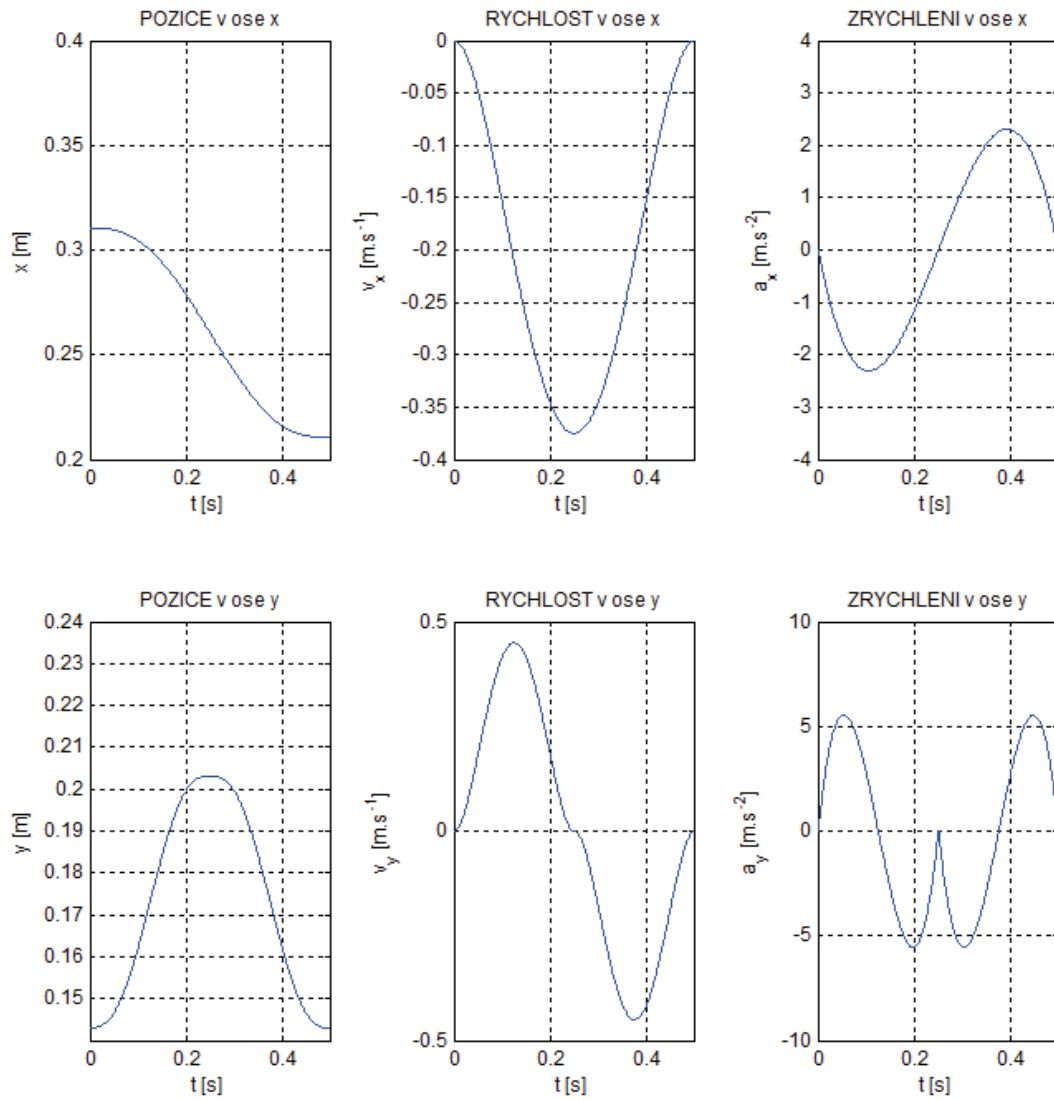
Obrázek 3.4: Představa pohybu manipulátoru při psaní na tabletu.

Při realizaci požadovaného pohybu je využita funkce `jtraj`³ z `robotic toolbox`⁴ [3]. Vstupem do takto použité funkce `jtraj` je počáteční a koncový bod v kartézských souřadnicích společně s časovým vektorem. Takto použitá funkce `jtraj` proloží počáteční a koncovou souřadnici vhodným polynomem pátého stupně. Mohl by být použit i polynom nižšího stupně (minimálně však polynom třetího stupně). Použitím polynomu stupně nižšího než je pátý by ovšem nebyl zajištěn hladký průběh rychlosti a zrychlení získaného následnou derivací průběhu polohy.

Takto získané průběhy pozice, rychlostí a zrychlení, tvořené hladkými funkcemi bez skokových změn, jsou znázorněny na obr. 3.5. Z průběhů lze vidět, že manipulátor je při pohybu realizovaném v osách x a y schopný přemístit koncový efektor z jednoho bodu do druhého (vzdálenost 0.1m) za 0,5 s.

³Funkce `jtraj` je původně určená pro výpočet kloubových souřadnic ze zadané dvojice bodů. Proložení je realizováno vhodným polynomem pátého stupně.

⁴`robotic toolbox` obsahuje spoustu předdefinovaných funkcí pro sestavování kinematických a dynamických modelů robotických manipulátorů

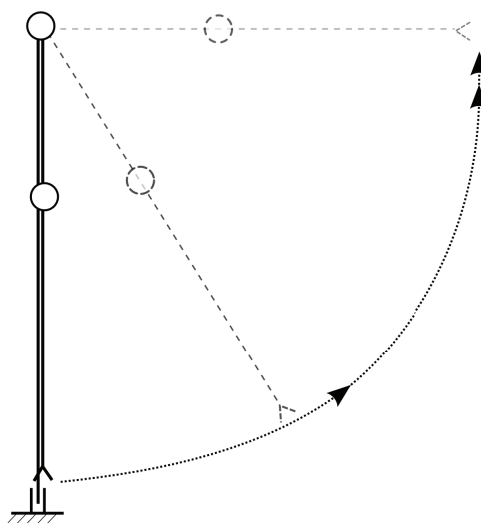


Obrázek 3.5: Průběhy kinematických veličin koncového bodu manipulátoru při "psaní na tabletu".

Dalším zkoumaným pohybem je takový, jehož cílem je jednoduché zvednutí obou koncových ramen ze svislé do vodorovné polohy za přiměřeně krátký časový okamžik.

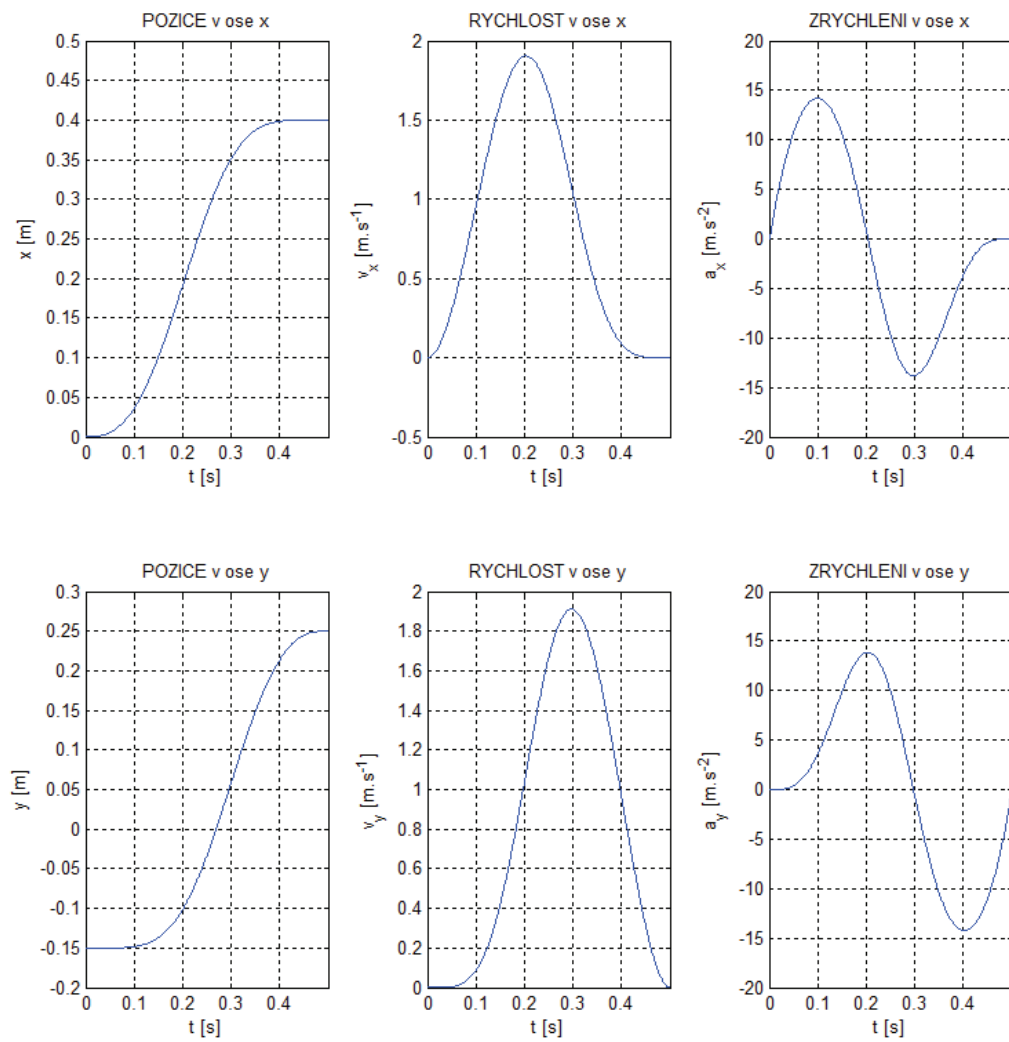
Plánování trajektorie tohoto pohybu zde bylo provedeno jednoduše přímo v kloubových souřadnicích.

Pro tento účel, jako u předchozího pohybu "psaní na tebletu", bylo použito plánování trajektorie za pomoci funkce `jtraj`. Plánování pohybu bylo provedeno pouze pro druhý pohon. První a třetí pohon v tomto případě měl setrvat v počáteční pozici. Takto plánovaný pohyb je patrný z obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Znázornění pohybu při zvedání koncových ramen manipulátoru.

Průběhy jednotlivých kinematických veličin (pozice, rychlosti a zrychlení) v kartézském souřadnicovém systému jsou patrné na obr. 3.7. Zvednutí ramene v tomto případě nastane za 0,5 s.



Obrázek 3.7: Průběhy kinematických veličin koncového bodu manipulátoru při zvednutí ramene.

3.3.2 Dynamický model

Předchozí část se zabývala kinematickou analýzou, kde byly z požadovaného pohybu v kartézských souřadnicích vypočítávány jednotlivé kloubové souřadnice.

Cílem této části, která se zabývá dynamikou manipulátoru, je stanovení maximálních momentů působících na jednotlivé pohony při pohybech nadefinovaných v části 3.3.1.

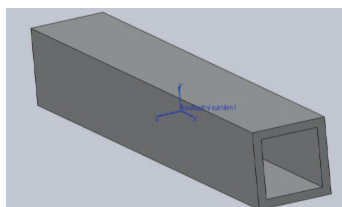
Základem pro sestavení dynamického modelu jsou parametry jako momenty setrvačnosti a v neposlední řadě také hmotnosti jednotlivých dílů manipulátoru.

Sestavení dynamického modelu bude opět provedeno v prostředí Simulink-Simmechanics.

Momenty setrvačnosti a hmotnosti jednotlivých částí manipulátoru

Výpočet setrvačností jednotlivých dílů manipulátoru vycházel při návrhu z konstrukčních možností, ze kterých byly určeny odhady hmotnosti jednotlivých dílů. Rozměry a hmotnosti jednotlivých dílů vychází z části 3.1. Z takto určených parametrů byly v prostředí SolidWorks namodelovány jednotlivé komponenty.

V prvotní fázi návrhu manipulátoru nebylo doposud známo, jaké přesné tvary budou mít jednotlivé komponenty. Proto byly jednotlivé části namodelovány jednoduchými tělesy jako je kvádr s dutinou (modely jednotlivých ramen) nebo plné válce (modely pohonů).



Obrázek 3.8: Zjednodušený model ramene r_2 - základní konstrukční prvek.

V prostředí SolidWorks pak bylo možné jednoduchým způsobem vygenerovat přímo matici setrvačnosti každého dílu. Na obrázku 3.8 je například vidět 3D model ramene r_2 v prostředí SolidWorks. Důležité je především to, že jednotlivé momenty setrvačnosti se vztahují vždy k těžišti každého dílu manipulátoru, čehož je s výhodou využito při zadávání matic setrvačností v Simmechanics.

Následně vygenerovaná matice setrvačnosti tohoto tělesa je uvedena v matici 3.1.

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.00011 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00133 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00133 \end{pmatrix} \text{ kg.m}^2 \quad (3.1)$$

Sestavení dynamického modelu

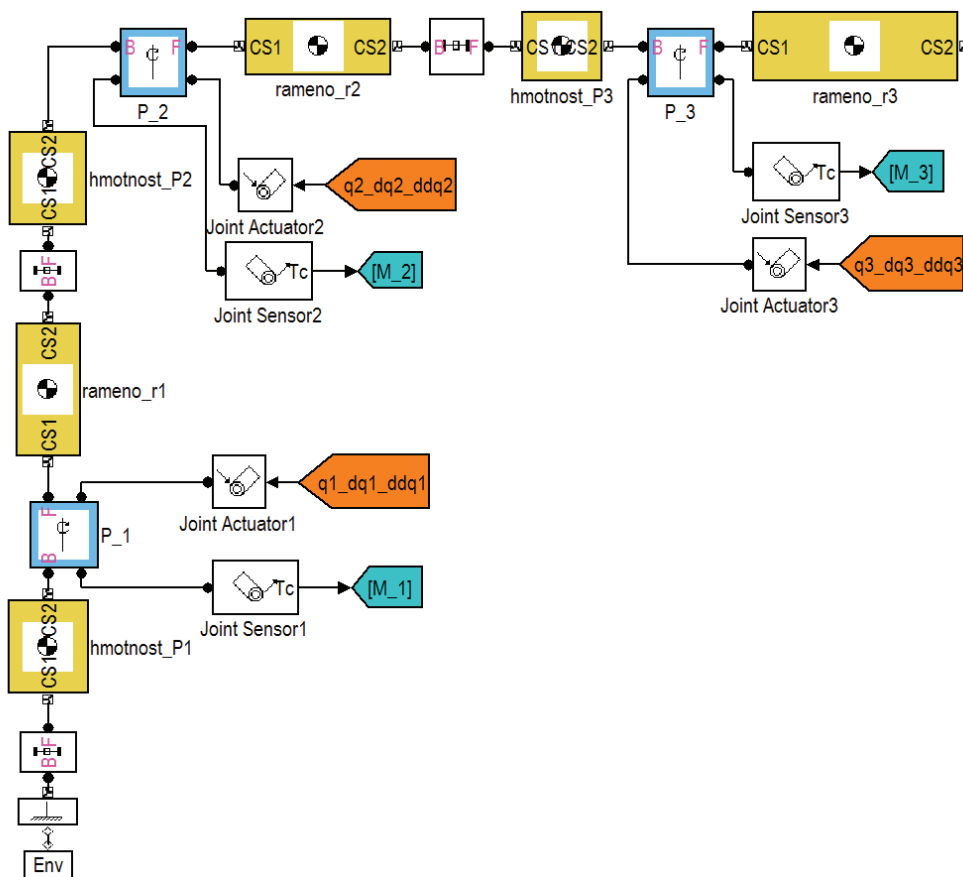
Dynamický model v Simmechanics je z velké části podobný dříve uvedenému kinematickému modelu z části 3.3.1 této kapitoly.

Do dynamického modelu jsou doplněny parametry jednotlivých těles, ze kterých je manipulátor složen (matice setrvačnosti a hmotnosti). Jednotlivá ramena jsou zvýrazněna žlutou barvou.

Následně je blokové schéma v Simmechanics doplněno o pomocná tělesa zanedbatelné délky, která představují hmotnosti a setrvačnosti jednotlivých pohonů (v blokovém schématu označeno jako $hmotnost_{P1}$, $hmotnost_{P2}$, $hmotnost_{P3}$ - zvýrazněno žlutě).

Kinematika kloubových souřadnic je generovaná předchozím kinematickým modelem a aplikována přes bloky Joint Actuator (zvýrazněno oranžovou barvou).

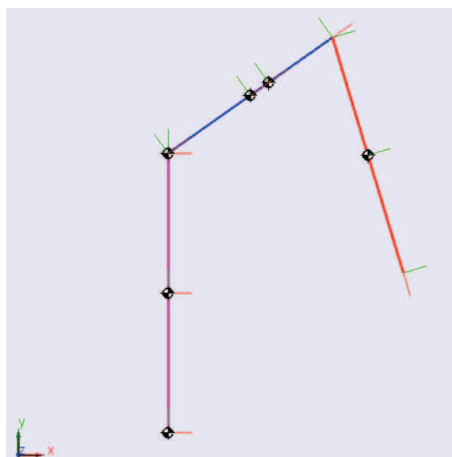
Pro snímání působících momentů v pohonech je použit blok Joint Sensor, na jehož výstupu je vypočítaný moment v Nm (zvýrazněno azurovou barvou).



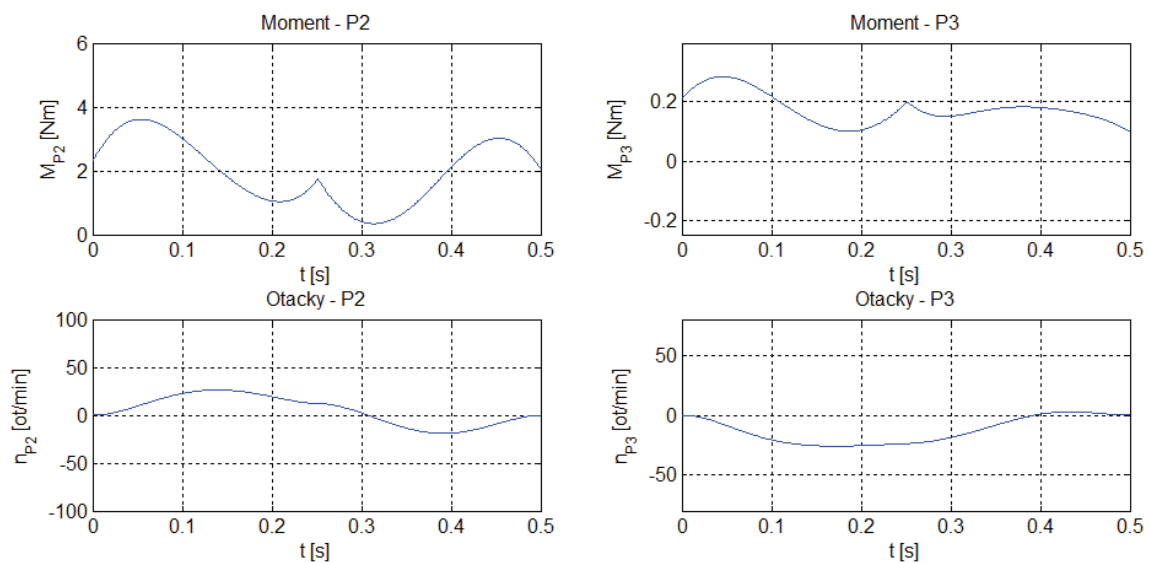
Obrázek 3.9: Blokové schéma dynamického modelu manipulátoru v Simmechanics.

Na obrázku 3.10 je pak vidět jednoduchá vizualizace modelu manipulátoru v prostředí Simmechanics.

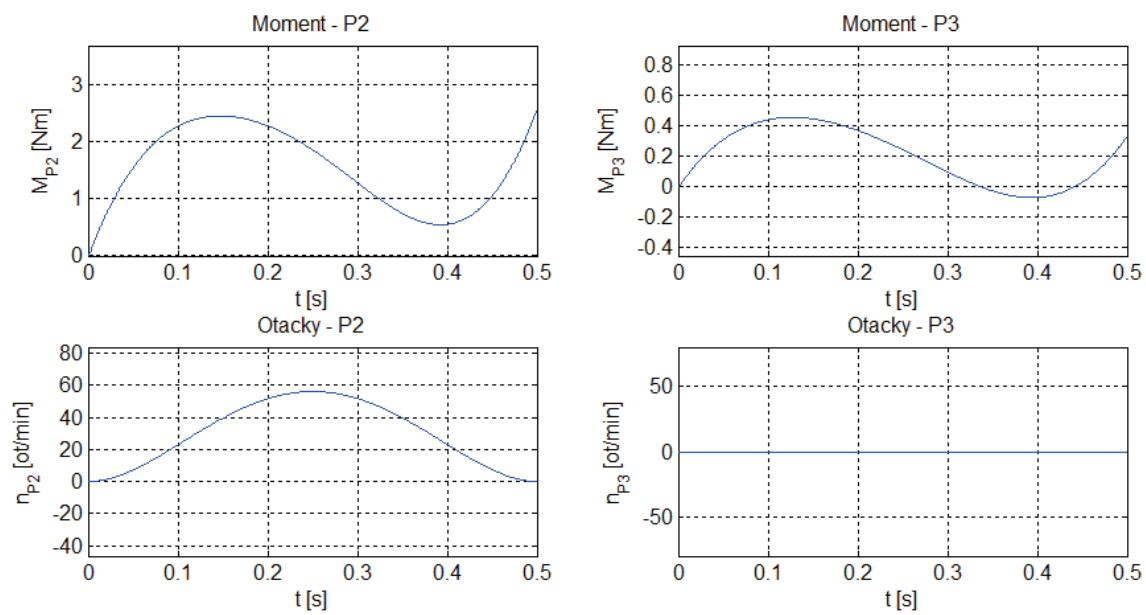
Výsledné průběhy momentů působících na pohony P_1 a P_2 a průběhy otáček při simulaci pohybu "psaní na tabletu" a zvedání ramene jsou pak vidět na obrázku 3.11 a 3.12. Z těchto průběhů jsou patrné především maximální momenty a otáčky, kterých pohony P_1 a P_2 dosahují při simulovaných pohybech. Tyto hodnoty jsou pak podkladem pro ověření dostatečného výkonu a správně navolených parametrů (převodový poměr převodovky, zvolené napájecí napětí, atd...) u zvolených pohonů.



Obrázek 3.10: Vizualizace modelu manipulátoru v prostředí Simmechanics.



Obrázek 3.11: Průběhy momentů a otáček v pohonech P1 a P2 při pohybu "psaní na tabletu".



Obrázek 3.12: Průběhy momentů a otáček v pohonech P1 a P2 při zvedání ramene.

3.4 Výběr pohonů

K dispozici pro realizaci manipulátoru byly níže uvedené pohony (sestava stejnosměrného motoru s převodovkou).

Předchozí část kapitoly se zabývala výpočtem maximálních momentů a otáček potřebných pro vykonání požadovaného pohybu. Následně vybrané pohony dosahují podle jejich momento-otáčkové charakteristiky udávané v datasheetech požadovaných parametrů s dostatečnou rezervou.

3.4.1 Pohon P1 a P2

DUNKERMOTOREN GR 63X55[4]

- výkon 100 W
- napájecí napětí 12V - 30V⁵
- jmenovitý moment na výstupu motoru 0.27 Nm
- jmenovitý proud 4.9 A
- otáčky naprázdno 3650 ot/min
- šneková převodovka, převodový poměr 15:1
- hmotnost 3.7 kg
- optický inkrementální enkodér 500 imp/ot

3.4.2 Pohon P3

TRANSMOTEC WLD4348[5]

- výkon 10W
- napájecí napětí 12V-24V⁶
- jmenovitý moment na výstupu motoru 0.043 Nm
- jmenovitý proud 0.8 A
- otáčky naprázdno 4000 ot/min
- šneková převodovka, převodový poměr 31:1
- hmotnost 0.6kg
- optický inkrementální enkodér 1000 imp/ot

⁵dále uvedené parametry jsou pro napájení 24V

⁶dále uvedené parametry jsou pro napájení 24V

4 Návrh a realizace elektroniky

Náplní této kapitoly je návrh elektroniky nezbytné pro správnou funkci manipulátoru. Je zde nejprve popis celkového zapojení elektroniky, s následným popisem návrhu a realizace jednotlivých částí.

4.1 Celkové zapojení manipulátoru

Celkové zapojení řídicí části, výkonové a ostatní elektroniky je patrné z obrázku 4.1.

Výpočtovým centrem řídicího hardware manipulátoru je počítač s kartou MF624¹ [6]. Tato karta poskytuje vstupy/výstupy běžící Real-Time aplikaci na počítači.

Generované řídicí signály jsou dále zpracovávány ochrannou elektronikou, která vyhodnocuje stavy koncových spínačů. Následně je prostřednictvím řídicích signálů přes výkonové H-můstky nastaveno na jednotlivých motorech požadované napětí.

Snímače natočení, v tomto případě použité inkrementální optické enkodéry, poté vracejí údaj o natočení jednotlivých pohonů. Tyto snímače natočení jsou upevněny přímo na hřídeli motoru. Pro získání výsledného rozlišení enkodérů je proto zapotřebí udávaný počet tiků za jednu otáčku násobit hodnotou převodového poměru použité převodovky. Tímto je získáno výsledné rozlišení natočení každého pohonu.

Dalším prvkem v obr. 4.1 jsou zdroje napětí (24V, 15V, 5V), které jsou realizovány průmyslovými zdroji napětí.

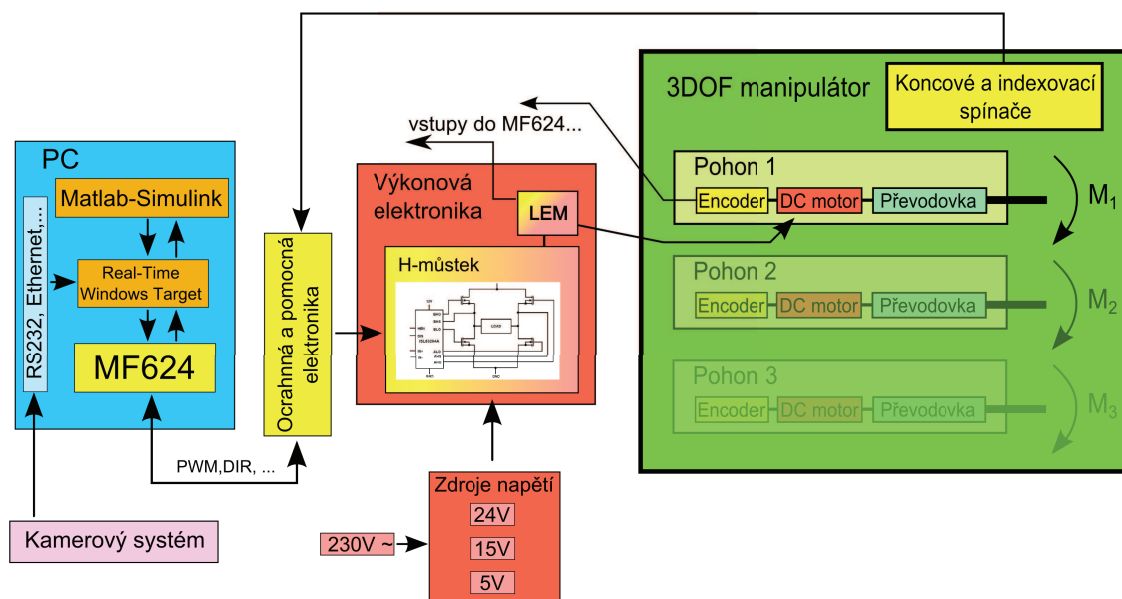
Napětím 15V je napájena řídicí část všech použitých H-můstku a pak také výkonová část H-můstku pro pohon P_1 . Napájení pohonu P_1 ze zdroje 15V (nominální napětí motoru je přitom 30V) je zde především kvůli snížení proudu tekoucího do motoru (tím následně i momentu). Vlivem předdimenzování není nutné (ani žádoucí), aby pohon P_1 dosahoval maximálních momentů, kterých je schopen při napájení nominálním napětím 30V.

Zdroj napětí 24V je pak použitý pro napájení výkonové části H-můstků, na které jsou připojeny pohony P_2 a P_3 .

Napájecí zdroj 5V je zde pro napájení ochranné elektroniky a optických oddělovačů digitálních signálů.

Proudy tekoucí přes jednotlivé H-můstky do pohonů jsou snímány čidly proudu (LEM). Výstupem každého použitého čidla proudu je analogový signál, který je poté přiveden na analogový vstup karty MF624.

¹MF624 - multifunkční vstupně/výstupní karta od firmy Hummusoft



Obrázek 4.1: Schéma celkového zapojení elektroniky manipulátoru.

Řídící signály generované kartou MF624

- PWM - pomocí střídý nastavuje hodnotu výstupního napětí
- DIR - nastavení polaritý výstupního napětí
- DIS - na všech výkonových tranzistorech nastaví na bázi nulové budící napětí - "odpojí" připojený motor

Signály zpracovávané kartou MF624

- signály z jednotlivých endkodérů
- analogové signály z čidel proudu (čidla LEM)
- ostatní analogové signály (akcelerometry a jiné snímače)
- signál DIAG - signál z výkonové elektroniky (informuje o stavu výkonové elektroniky)

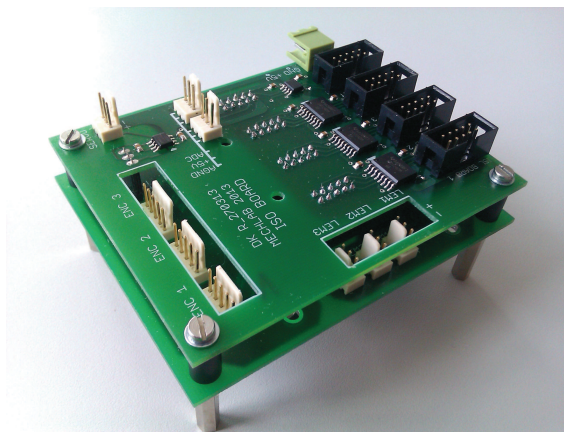
4.2 Konektorová deska

Karta MF624 má své vstupní/výstupní piny vyvedeny prostřednictvím konektorů canon s 37 kontakty. Aby bylo možné jednoduše a přehledněji zapojovat jednotlivou elektroniku manipulátoru, byla navržena konektorová deska, kde jsou rozvedeny jednotlivé vstupy/výstupy a napájení z karty na soubor samostatných konektorů.

Základem této desky je také galvanické oddělení všech digitálních vstupů/výstupů z karty. Mimo jiného toto galvanické oddělení umožnilo napájet připojenou elektroniku z "externího" zdroje, čímž se také zajistil znatelně menší proudový odběr z karty (narozdíl od napájení připojené elektroniky přímo ze zdroje karty MF624).

Napájení konektorové desky zajišťuje 5V zdroj napětí. Z tohoto zdroje je pak případně napájeno připojené servo a ostatní připojené digitální periferie.

Připojení samotné karty MF624 je realizováno konektory canon umístěnými ze spodní části konektorové desky.



Obrázek 4.2: Výsledná realizace konektorové desky s galvanickým oddělením.

Jak je vidět z obr. 4.2, výsledná konektorová deska je realizována jako dvoustupňová. Na prvním (spodním) stupni je provedeno samotné vyvedení jednotlivých konektorů. Na vrchní desce je realizováno galvanické oddělení digitálních signálů s napájením z externího zdroje (5V).

Návrh DPS² byl proveden v programu Eagle³. Kompletní schéma zapojení s kartou MF624 a podklady pro výrobu jsou součástí přílohy.

²DPS - deska plošných spojů

³Eagle-prostředí pro návrh plošných spojů (použitá verze Eagle 6.0.0)

4.2.1 Specifikace realizované konektorové desky

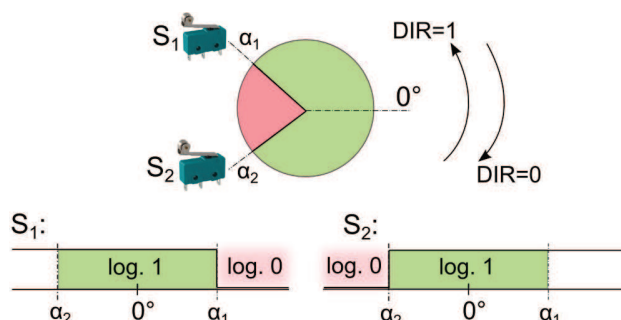
- konektory pro připojení jednotlivých H-můstků a enkodérů
- analogové konektory pro připojení čidel proudu a ostatních analogových snímačů
- konektor pro připojení ostatních digitálních vstupů/výstupů
- konektor pro připojení modelářského servo pohonu
- galvanické oddělení digitálních signálů obvodu ISO7240MDW a ISO7220MDR

4.3 Ochranná elektronika

Cílem ochranné elektroniky je zajistit bezpečný provoz manipulátoru tím, že bude dodržován pohyb v určitém rozsahu natočení jednotlivých ramen. Mezní polohou (natočením) zde budeme nazývat koncovou polohu daného pohonu (respektive ramene se kterým tento pohon otáčí). Hodnoty koncových poloh vychází z části 3.2, kde je specifikován pracovní prostor manipulátoru.

Omezení je nutné, protože vlivem dalšího pohybu ve stejném směru, kterým se pohon do této polohy dostal, by mohlo dojít k mechanickému poškození konstrukce a celého manipulátoru. Dále by mohlo dojít vlivem nekontrolovatelného otáčení manipulátoru k ohrožování okolí.

Pro indikaci stavu, kdy se pohon bude nacházet v jedné ze dvou koncových poloh, je využit systém vačky a mikropsínače. V případě najetí pohonu do koncového polohy se sepne mikropsínač a ten bude signalizovat změnou logické úrovně příslušného digitálního signálu mezní stav. Jak je patrné z obrázku 4.3, v případě že se pohon nenachází v žádné z koncových poloh (kde jsou umístěny koncové spínače S1 a S2), je úroveň příslušného signálu v log. 1. V případě, že se pohon nachází v koncové poloze a nebo případně za touto koncovou polohou, je úroveň příslušného signálu v log. 0.



Obrázek 4.3: Znázornění funkce koncového spínače.

V případě, že by vypínání pohonu bylo řešeno jednoduchým vypínačem (který by např. odpojil napájení pohonů a tím zamezil dalšímu pohybu do nežádoucí polohy), docházelo by ke stavu, kdy samotné řízení nemůže z této koncové polohy samostatně vyjet. Je nutné tedy navrhnout logiku, která bude vyhodnocovat:

- stav koncového spínače (pohon je/není v krajní poloze)
- požadovaný směr otáčení daného pohonu (DIR)

Tato funkce musí být z bezpečnostních důvodů zajištěna přímo na hardwarové úrovni bez jakéhokoliv běžícího softwaru, který by mohl nějakým způsobem "zkolabovat" a tak svou nečinností zapříčinit potenciálně nebezpečný provoz manipulátoru.

4.3.1 Funkce ochranné logiky

Pro nadefinování funkce ochranné logiky je vytvořena pravdivostní tabulka 4.1. Z této tabulky plynou dva provozní stavy. První, kdy se pohon nachází v normálním stavu a jeho pohyb není nějak omezen (pohon se nenachází v žádné z koncových poloh).

Druhý stav je ten, kdy se pohon nachází v jedné z koncových poloh. V tom případě je nutné pohon zastavit a čekat na řídicí signály, než dojde k požadovanému pohybu pohonu opačným směrem - ven z krajní polohy (směrem do povoleného prostoru).

Logická hodnota 1 ve sloupcích S1 a S2 tabulky 4.1 indikuje sepnutí příslušného koncového spínače. Logická hodnota 0 indikuje naopak rozpojený stav spínače.

Zvolení log. 1 (napěťová úroveň 5V) pro "povolený" stav je výhodné zejména kvůli bezpečnosti, kdy v případě upadlého vodiče u koncových spínačů se stav vyhodnocuje také jako chybový, tj. log. 0.

Tabulka 4.1: Logika ochranné elektroniky.

DIR in	S1	S2	DIR out	PWM enable	stav
0	0	0	1	0	zastavení pohonu
0	0	1	0	1	elektronika nezasahuje
0	1	0	1	0	zastavení pohonu
0	1	1	0	1	elektronika nezasahuje
1	0	0	0	0	zastavení pohonu
1	0	1	0	0	zastavení pohonu
1	1	0	1	1	elektronika nezasahuje
1	1	1	1	1	elektronika nezasahuje

Vstupní signály

- **S1** - informace o tom, zda je sepnut koncový spínač S1
- **S2** - informace o tom, zda je sepnut koncový spínač S2
- **DIR in** - informace o požadovaném směru otáčení, který generuje řídicí algoritmus

Výstupní signály

- **DIR out** - upravený směr otáčení, který je možný v závislosti na kombinaci sepnutí dvou koncových spínačů
- **PWM enable** - log. 1 zajistí neměnnou střidu signálu PWM (signál PWM projde ochrannou logikou beze změny), v případě, že nastane log. 0 je zajištěno nastavení nulové střidy vstupního signálu PWM

4.3.2 Sestavení logické funkce

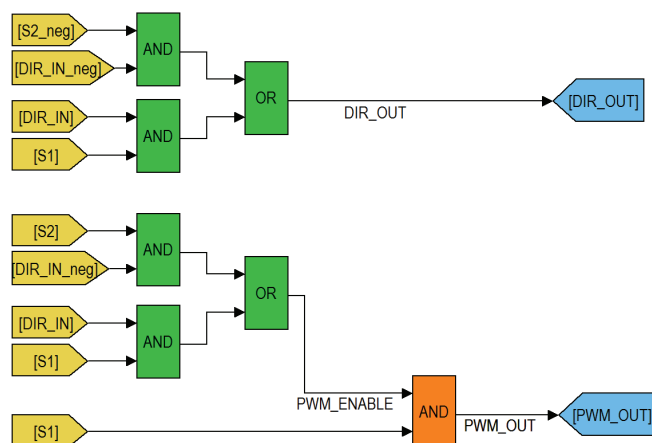
Z pravdivostní tabulky 4.1 byly s využitím Karnaughových map pro minimalizaci funkce sestaveny následující pravdivostní funkce:

$$DIR_{OUT} = \overline{S_2} \cdot \overline{DIR_{IN}} + S_1 \cdot DIR_{IN} \quad (4.1)$$

$$PWM_{ENABLE} = S_2 \cdot \overline{DIR_{IN}} + S_1 \cdot DIR_{IN} \quad (4.2)$$

Tyto logické funkce byly převedeny do grafické podoby modelu v prostředí Simulink, kde jsou zvýrazněny zeleně (obr. 4.4). Takto vytvořený model funkce ochranné elektroniky sloužil především pro ověření správnosti sestavených logických funkcí s ohledem na definovanou pravdivostní tabulku.

Jak je patrné z obr. 4.4, součástí výsledného schématu je navíc obvod AND (zvýrazněno oranžově), do kterého je na jeden vstup přiveden signál PWM_{enable} a na druhý vstup signál PWM_{in} generovaný kartou MF624. Žlutou barvou jsou pak zvýrazněny vstupní signály a modrou výstupní signály.



Obrázek 4.4: Sestavení logického schématu v prostředí Simulink.

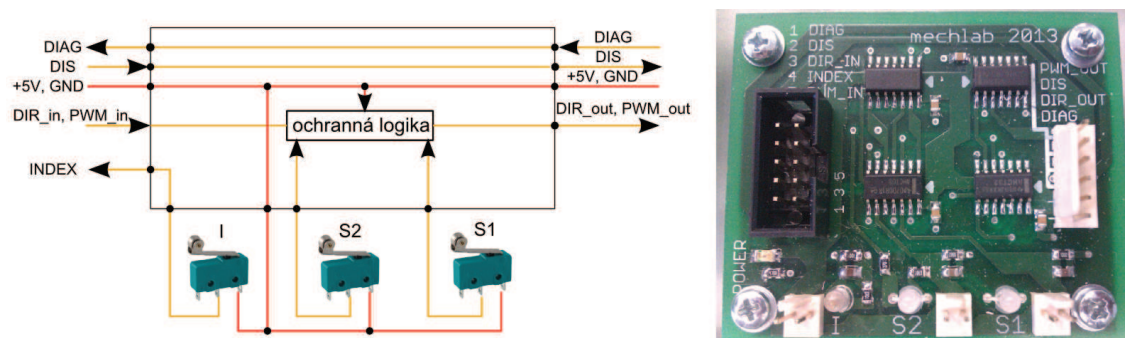
4.3.3 Realizace ochranné elektroniky

Pro samotnou realizaci obvodu byla použita velmi rychlá logická hradla:

- SN74AHCT08D (AND)
- SN74AHCT32D (OR)
- SN74AHCT04D (NOT)

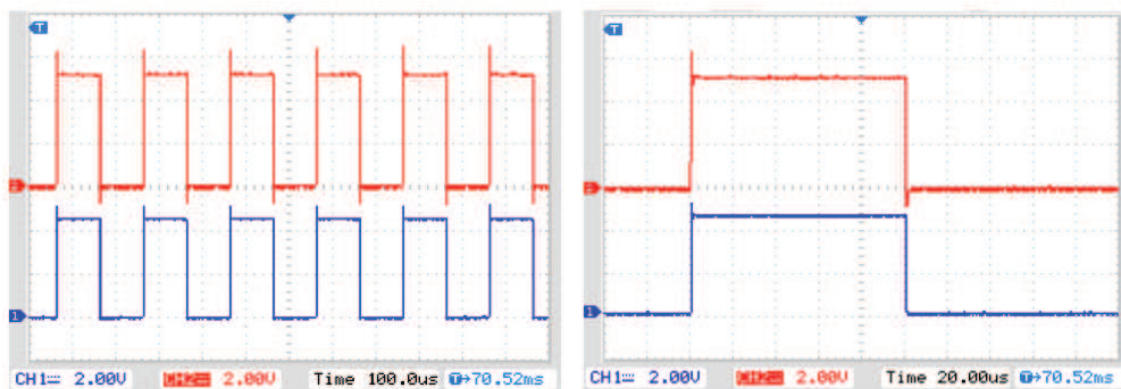
Součástí návrhu DPS bylo zakomponování konektoru pro připojení indexovacího spínače pro určování absolutní polohy pohonů. Blokové schéma návrhu ochranné elektroniky lze vidět na obr. 4.5 vlevo.

Vlastní návrh DPS byl proveden v programu Eagle. Osazená hotová DPS je pak vidět na obr. 4.5 vpravo. Součástí jsou i LED, které změnou barvy ze zelené na červenou indikují případné najetí pohonu do koncové polohy.



Obrázek 4.5: Blokové schéma a realizace ochranné elektroniky.

Na obr. je pomocí osciloskopu zachycen průběh signál PWM vstupujícího do ochranné elektroniky (červěně) a signál generovaný ochrannou elektronikou (modře). Je patrné že signál PWM není průchodem přes rychlé hradlo AND téměř vůbec zkreslen nebo deformován. Dochází pouze k nepatrnému zpoždění signálu (osciloskopem určené zpoždění je přibližně 5ns).



Obrázek 4.6: Vstupní signál PWM (červěně) a výstupní signál PWM (modře). Detail (vpravo).

4.3.4 Specifikace zrealizované ochranné elektroniky

Konektor pro připojení na konektorovou desku

- pin 1 - DIAG
- pin 2 - DIS
- pin 3 - DIR in
- pin 4 - INDEX
- pin 5 - PWM in
- pin 6 - nepřipojeno
- pin 7,8 - +5V
- pin 9,10 - GND

Konektor pro připojení k výkonovému H-můstku

- pin 1 - PWM out
- pin 2 - DIS
- pin 3 - DIR out
- pin 4 - DIAG
- pin 5 - +5V
- pin 6 - GND

Konektory I, S1, S2

- pin 1 - +5V
- pin 2 - signálový pin - výstup ze spínače

4.4 Výkonová elektronika

Výkonová část elektroniky manipulátoru byla vyrobena podle návrhu Ing. Josefa Vejlupka, který byl součástí jeho diplomové práce [7]. Jedná se o plný H-můstek sestavený z MOSFET tranzistorů IRFB4115 a řídicího obvodu ISL7421C. Zatížení, které tento výkonový H-můstek snese, je plně dostačující pro připojení pohonů manipulátoru.

Stručný přehled parametrů použité výkonové elektroniky

- výstupní napětí 0-60V
- dodávaný proud až 104A
- pro snímání proudu je k dispozici čidlo LEM (parametry konkrétních čidel LEM osazených na deskách k jednotlivým pohonům se liší)

5 Bezpečný a spolehlivý provoz manipulátoru

Tato kapitola se bude zabývat návrhem řídicího softwaru tak, aby byl zajištěn spolehlivý a bezpečný provoz manipulátoru. K řízení bude využito toolboxů zaměřených na Real-Time aplikace v prostředí Matlab-Simulink.

V kapitole budou uvedeny jak inicializační a ukončovací sekvence, tak softwarové prvky vykonávající se v průběhu provozu manipulátoru.

Následně všechny takto vytvořené části, které slouží pro řízení manipulátoru a sběr informací o aktuálním stavu, budou sestaveny do knihovny použitelné v prostředí Simulink. Vytvoření této knihovny by tak mělo přispět k jednoduchému a bezpečnému provozu manipulátoru jako výukového modelu.

5.1 Real-Time a prostředí Simulink

Pro vytvoření Real-Time řídicího software bylo využito prostředí Matlab-Simulink¹. Součástí tohoto prostředí je toolbox *Real-Time Windows Target*. Tento toolbox poskytuje mimo jiné přístup k vstupům/výstupům použité karty MF624. Mimo jiné také tento toolbox umožňuje využívání komunikačních portů, které jsou dostupné v použitém počítači (sériový port, ethernetová komunikace,...).

Pro sestavení řídicí Real-Time aplikace lze také využít *Real-Time toolbox*. Použití tohoto toolboxu je na první pohled jednodušší (model vytvořený v Simulinku není nutné kompilovat). Praktické využití tohoto toolboxu ovšem při obsáhlejší struktuře řízení (řízení manipulátoru vyžaduje vše třikrát - tři řízené pohony) není vhodné, zejména kvůli nedostatečné prioritě běhu aplikace pod operačním systémem. Využití Real-Time toolboxu vede k vytvoření soft² Real-Time aplikace.

Naopak použitím dříve zmíněného *Real-Time Windows Target* toolboxu běží vytvořená Real-Time aplikace bez režie operačního systému. Tím je zajištěna větší determiničnost běhu řídicí struktury. Takto běžící Real-Time aplikace se více blíží hard³ Real-Time aplikaci. S toolboxem *Real-Time Windows Targetu* (dále jen RTWT) lze také dosáhnout větších rychlostí běžících řídicích smyček, kdy není problém dosáhnout rychlosti více jak 1kHz, což je rychlost pro *Real-Time toolbox* při dané aplikaci téměř nedosažitelná.

¹Matlab 2010b

²Soft Real-Time - garantuje max. dobu většiny prováděných operací

³Hard Real-Time - garantuje max. dobu všech prováděných operací

5.1.1 Použité prvky z RTWT toolboxu

V této části budou stručně popsány použité bloky RTWT toolboxu. Podrobný popis jednotlivých funkcí je uvedený v helpu RTWT toolboxu.

Digital Input/Output

- propojuje digitální signál připojený na vstup/výstup vybrané karty s modelem v Simulinku

Analog Input/Output

- propojuje analogový signál připojený na A/D, D/A převodníky nainstalované karty s modelem v Simulinku

Frequency Output

- generuje PWM signál na vybrané kartě (nastavením frekvence PWM a střídý)

Encoder Input

- výstup z připojeného enkodéru zpracovaný nainstalovanou kartou (počet tiků)

Packet Input

- umožňuje komunikovat se sériovým portem, který je k dispozici v počítači (příjem a posílání dat přes RS232)

5.2 Určování absolutní polohy pohonů

Využívané snímače natočení (inkrementální optické endkodéry), které jsou součástí jednotlivých pohonů, určují natočení jednotlivých pohonů pouze relativně. Pro jakékoliv řízení ramen manipulátoru a tím i polohy koncového efektoru v absolutním souřadnicovém systému je nutné určit natočení jednotlivých pohonů absolutně.

Běžně se pro určení absolutního natočení využívají indexovací piny použitých inkrementálních optických enkodérů. Jelikož jsou optické enkodéry umístěny přímo na hřídeli motoru a ne na výstupu z převodovky, bylo by detekováno několik indexovacích pulzů na jednu otáčku výstupu z převodovky. Tento fakt proto znemožňuje jednoduché použití těchto indexovacích výstupů přímo ze snímačů natočení.

5.2.1 Využití indexovacích spínačů

Pro účel nalezení absolutní polohy pohonů byly do konstrukce manipulátoru zakomponovány vhodně umístěné indexovací spínače. Tyto spínače při najetí do nulové polohy⁴ generují indexovací signál - indexovací pulz. Tato funkce je alternativní k využití funkce indexovacího signálu přímo z optických enkodérů. Připojení indexovacího spínače je realizováno přes ochrannou elektroniku, kde je přímo konektor pro připojení tohoto spínače.

⁴nulová poloha je dána základním postavením manipulátoru

Ze znalosti aktuálního směru otáčení a detekce náběžné nebo sestupné hrany indexovacího signálu lze jednoznačně určit absolutní polohu ramene v daném okamžiku.

Algoritmus pro zpracování indexovacího signálu

Pro získání absolutní polohy je využit dvouhodnotový indexovací signál (spínač je ve stavu sepnuto, nebo rozepnuto), který je přiveden na digitální vstup karty MF624.

Průběh zpracování takto získaného digitálního signálu v prostředí Simulinku je vidět na obr. 5.1. Žlutou barvou jsou zvýrazněny vstupní signály (relativní natočení z připojeného enkodéru a indexovací signál).

Část zvýrazněná červeně funguje pro detekci okamžiku, kdy je enkodér natočen v nulové absolutní pozici - výstupem je signál INDEX. V okamžiku vyhodnocení průchodu pohonu nulovou pozicí se tedy do paměti offsetu (zvýrazněno azurovou barvou) uloží offset natočení pohonů vůči absolutní poloze.

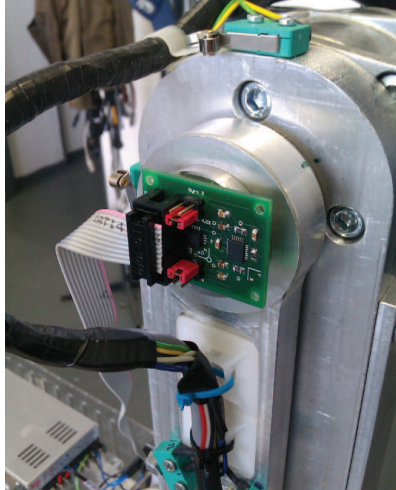
Aktuální směr otáčení je určen v části zvýrazněné fialovou barvou. Vyhodnocení směru (výstupem je signál DIR) se děje ze známého předchozího a aktuálního natočení.

V části zvýrazněné zelenou barvou se pak nalezený offset, který byl při spuštění manipulátoru neznámý, přičítá k relativně určenému natočení z enkodéru. Přičítání offsetu se provádí přes filtr typu dolní propust, pro zamezení skokové změny vypočítaného natočení. Tímto způsobem se vždy průchodem přes nulovou pozici natočení určí odchylka od požadovaného nulového natočení (hodnota 0), které by mělo nastat při detekci hran indexovacího signálu. V bločku s názvem "ukladani do pameti offsetu" je pak možné nastavit dodatečný offset pro přesné nastavení požadované nulové polohy.

Výstupem je pak absolutně určené natočení jednotlivých pohonů přepočítané na radiány.

Tento algoritmus zpracování indexovacího signálu a relativní polohy z enkodéru je pak využit u všech použitých pohonů.

Pro testování možnosti výpočtu natočení byl prozatím použit pouze jeden akcelerometr. Tento akcelerometr byl vhodně umístěn do osy rotace druhého pohonu tak, aby i při pohybu jakékoliv části manipulátoru na tento akcelerometr působilo pouze gravitační zrychlení (viz. obr. 5.2).



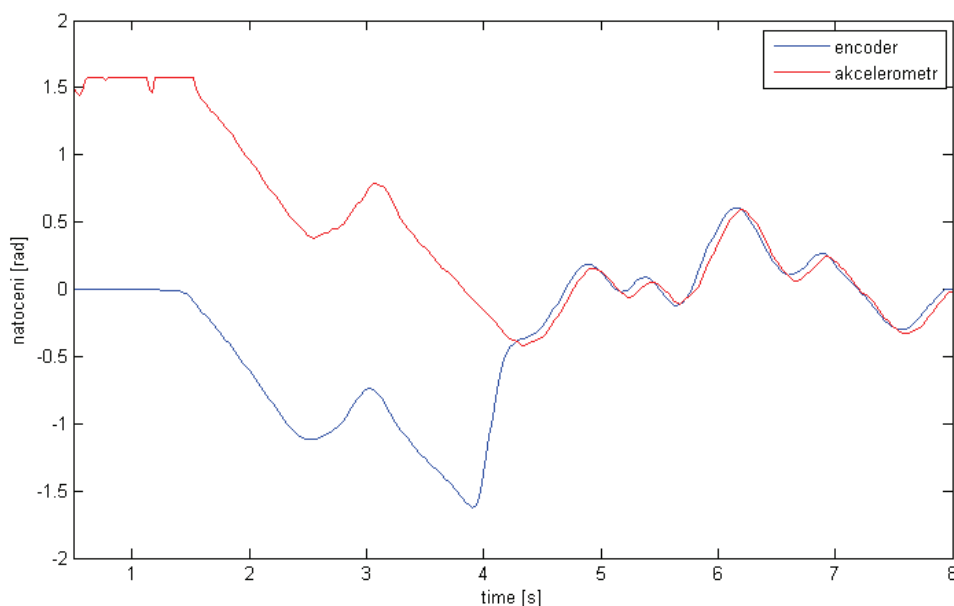
Obrázek 5.2: Umístění akcelerometru v ose druhého pohonu.

Převodem analogového signálu z akcelerometru a použitím rovnice 5.1 je vypočteno aktuální natočení α . V argumentu funkce je hodnota výstupu z AD převodníku (AD_{acc}) naškálovaná na rozsah -1 až 1.

$$\alpha = \arcsin(AD_{acc}) \quad (5.1)$$

Takto určené natočení je definované vzhledem k základně mechanické konstrukce s předpokladem, že manipulátor je umístěn na zcela rovném povrchu (kde na základnu manipulátoru působí gravitační zrychlení kolmo). Z tohoto předpokladu plyne možná nevýhoda použití akcelerometru pro tento účel. Pro přesné určení natočení jednotlivých ramen manipulátoru vzhledem k základně manipulátoru by bylo vhodné snímat i samotné natočení základny (vzhledem ke směru působení gravitačního zrychlení).

Srovnání průběhu natočení získaného z akcelerometru (vhodně umístěného podle obr. 5.2) a inkrementálního enkodéru (který je součástí druhého pohonu) lze vidět na obr. 5.3. Modrou barvou je zde patrný průběh natočení získaný z enkodéru, který sám o sobě určuje relativní natočení. V čase zhruba 4,5 s dojde k inicializaci tohoto signálu a nulová poloha je již nastavena správně. O průběhu natočení, získaného výše popsáním použitým akcelerometrem, se dá říct, že je od samého začátku určen absolutně.



Obrázek 5.3: Průběh natočení získaného z enkodérů (modrou barvou) a z akcelerometru (červenou barvou).

5.3 Knihovna pro snadné a bezpečné řízení manipulátoru v prostředí Simulink

Při návrhu a realizaci manipulátoru se ukázalo jako vhodné vytvořit knihovnu, která by sloužila pro ovládání manipulátoru v prostředí Simulink. Tato knihovna obsahuje základní prvky manipulátoru, jako jsou jednotlivé pohony, enkodéry a ostatní elektronické části.

Použití této knihovny pak vede ke zjednodušení návrhu pokročilejší aplikace, jelikož funkce té nejnižší úrovně jsou již zakomponovány v jednotlivých blocích knihovny.

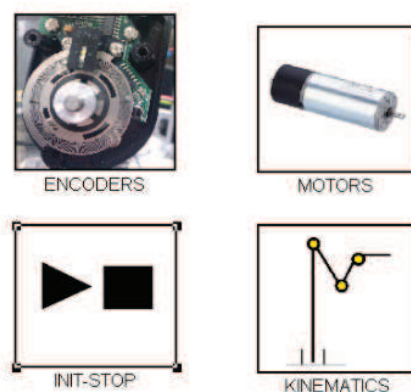
Velký důraz při tvorbě knihovny byl kladen na to, aby se manipulátor "choval" bezpečně a spolehlivě i za předpokladu, že uživatel vytvoří špatně navrženou řídicí aplikaci. Špatně navržená řídicí aplikace může vést k nepředvídatelnému chování manipulátoru a následně k jeho poškození, případně k ohrožování svého okolí. Proto byly do knihovny zakomponovány jednoduché bezpečnostní prvky, které mají za cíl pohyb manipulátoru omezit.

Pro vytvoření knihovny jsou využity základní bločky dostupné v Real-Time Windows Target toolboxu. Z těchto základních bloků jsou vytvořeny komplexnější

a funkčně pokročilejší nové subsistémy, které jsou následně zakomponovány do knihovny pro Simulink⁶.

5.3.1 Jednotlivé části knihovny

Jak je patrné z obr. 5.4, knihovna je rozdělena do několika částí.

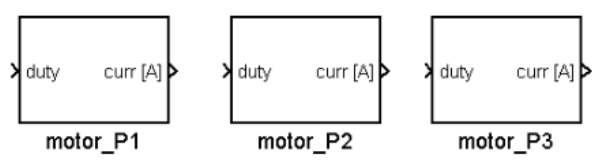


Obrázek 5.4: Rozdělení knihovny pro jednoduché použití manipulátoru.

Část pro obsluhu pohonů - "Motors"

Tato část knihovny obsahuje bločky, které reprezentují použité DC motory. Vstupním signálem je střída pro nastavení napětí na daném motoru (v rozsahu -1 až 1 podle požadovaného směru). Výstupním signálem z bločku je proud tekoucí motorem⁷ (snímáno čidlem LEM na H-můstku).

Bezpečnostním prvkem je proudové omezení, které je integrováno do funkce těchto bločků. Při překročení povoleného proudu dojde k zastavení pohybu manipulátoru.



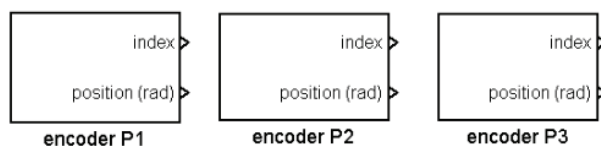
Obrázek 5.5: Prvky části knihovny "motors".

⁶komptibilita knihovny je zajištěna s verzí Matlab-Simulink 2010b

⁷výstupní proud z bločku je přímo v ampérách

Část pro snímání natočení - "Encoders"

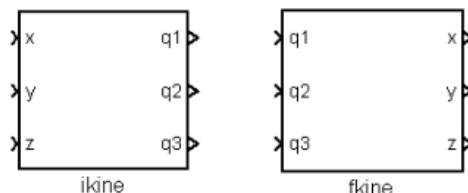
Další část knihovny je tvořena bločky prezentujícími jednotlivé enkodéry. Výstupním signálem je poloha určená enkodérem, do které je již zahrnutý indexovací signál. V případě, že tedy dojde k zaznamenání indexovacího signálu, je pozice automaticky vynulována. Druhým výstupem je informace o indexovacím signálu, který slouží k zaznamenání stavu, kdy byl pohon "indexován" (nastaven do nulové polohy). Signál "index" je využit při inicializační sekvenci daného pohonu.



Obrázek 5.6: Prvky části knihovny - "encoders".

Část pro výpočet kinematiky - "Kinematics"

Součástí knihovny jsou také bločky inverzní a dopředné kinematiky manipulátoru. Při využití těchto bločků je v nastavení možné zadat aktuální délku koncového efektoru (podle aktuálního použití).



Obrázek 5.7: Prvky části knihovny - "kinematics".

Inicializace a zastavení manipulátoru - "INIT-STOP"

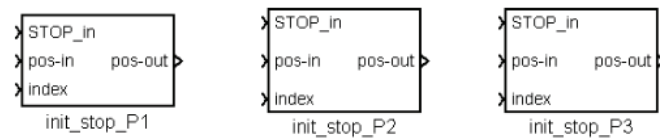
Důležitou roli při použití manipulátoru je jeho inicializace na počáteční - nulovou polohu. Tato poloha je určena pomocí indexovacích spínačů (viz. část 5.2.1).

Využitím bločků *init-stop* se do navrhované řídicí struktury zakomponuje právě požadovaná inicializační a ukončovací sekvence.

Prvním vstupem do tohoto bločku je *STOP-in*. Po přivedení log. 1 na tento vstup se manipulátor uvede do výchozí (nulové) polohy a ukončí se běžící model v Simulinku společně s paralelně běžící Real-Time aplikací.

Vstupní signál *pos-in* slouží pro přivedení požadované hodnoty natočení pohonu. Výstupní signál *pos-out* je pak výstupní požadovaná hodnota natočení, která je upravená v případě požadavku na provedení inicializační nebo ukončovací sekvence.

Třetí vstup *index* slouží pro připojení indexovacího signálu (generovaný bločkem příslušného enkodéru).



Obrázek 5.8: Prvky části knihovny - "INIT-STOP".

6 Využití kamerového systému

Často používanou "senzorickou" částí pro průmyslové manipulátory je systém počítačového vidění založený na snímání obrazu scény s manipulátorem. Snímaný obraz je poté upraven a vyhodnocen. Využití těchto metod počítačového vidění je velice rozsáhlé. Může se jednat např. o úlohy jako je detekce správného tvaru výrobku, nebo hledání polohy tohoto výrobku v pracovním prostoru manipulátoru.

Náplní této práce není problematika zabývající se návrhem samotných algoritmů pro zpracování a vyhodnocování obrazu. Tato kapitola se zabývá komplexním nástrojem, kterým je kamerový systém od společnosti National Instruments (NI). K realizaci samotného počítačového zpracování a vyhodnocení obrazu byly využity specializované softwarové nástroje poskytované společností NI.

6.1 Použitá kamera

Pro snímání scény s manipulátorem je použit hardware od NI. Je použita kamera NI 1742[8], která je řazena mezi tzv. smart¹ kamery. Základní parametry kamery jsou:

- **monochromatický² CCD³** snímač obrazu s rozlišením 640x480 pixelů
- **max. 60 fps⁴**
- **Real-Time** počítač (základem je procesor PowerPC (533 MHz), k dispozici pak 128 MB paměti)

Použitá smart kamera tedy funguje jako samostatná jednotka, která snímá obraz, poté jej zpracuje a vyhodnotí. Po takto provedeném automatickém zpracování obrazu jsou výsledky provedeného algoritmu (např. poloha snímaného předmětu) odeslány pomocí některého průmyslového protokolu (RS232 nebo Ethernet) do jiného zařízení.

Vytvoření aplikace, která má za úkol zpracovat a vyhodnotit snímaný obraz, je možné uskutečnit dvěma způsoby. Prvním z nich je využít již velmi rozšířené prostředí LabVIEW společně s příslušnými moduly. Dalším způsobem jak vytvořit aplikaci pro zpracování a vyhodnocení snímaného obrazu je použití specializovaného softwaru - Vision Builder AI. Tento software je přímo vyvinutý k tvorbě automatických inspekcí vyhodnocujících obraz ze smart kamery.

¹Smart kamera od NI je složena z části pro snímání obrazu a z části, která snímaný obraz zpracovává uloženým algoritmem pro zpracování obrazu ve vestavěném Real-Time počítači

²hodnota každého pixelu může nabývat 256 úrovní (šedi)

³CCD -Charge coupled device

⁴fps-frames per second

6.1.1 Prostředí LabVIEW

Vytvořené aplikace pro zpracování a vyhodnocení obrazu v LabVIEW probíhá pomocí grafického programování, tak jak je v LabVIEW zvykem. Je nutné doplnit základní platformu LabVIEW o příslušné moduly, kterými jsou:

- *Real-Time Module* - slouží k vytvoření Real-Time aplikace určenou k běhu v kameře
- *NI Vision Development Module* - obsahuje knihovnu algoritmů pro zpracování obrazu připravených k použití při programování v LabVIEW
- *Vision Assistant* - pro jednodušší implementaci algoritmů pro zpracování obrazu v LabVIEW

Výhody

- pohodlnější práce s výsledky ze zpracovaného a vyhodnoceného obrazu - jsou k dispozici téměř všechny funkce ze základního prostředí LabVIEW
- pomocí grafického programování si uživatel může přesně přizpůsobit vyvíjenou aplikaci - tím i zrychlit běh algoritmu při následné implementaci do Real-Time počítače v kameře

Nevýhody

- je nutná znalost grafického programování v LabVIEW
- zdoluhavější implementace vytvořeného programu do samotné kamery (vytváření projektu se strukturou jako pro klasické Real-Time zařízení od NI)
- komplikovanější návrh algoritmu pro zpracování a vyhodnocení obrazu

6.1.2 Prostředí Vision Builder AI

Prostředí Vision Builder AI (VBAI) je navrženo tak, aby byl uživatel schopný navrhnout aplikaci pro zpracování a vyhodnocení snímaného obrazu bez znalosti programování. Je tedy možné se přímo zaměřit na využití algoritmů pro zpracování a vyhodnocení obrazu.

Prostředí obsahuje podobnou škálu použitelných algoritmů pro zpracování a vyhodnocení obrazu jako v dříve zmíněném prostředí LabVIEW. Aplikace pro zpracování a vyhodnocení obrazu se zde tvoří formou automatických inspekcí. Kroky vedoucí k vytvoření požadované automatické inspekce budou popsány v dalších částech této kapitoly.

Výhody

- rychlejší návrh cílové aplikace
- jednodušší návrh vlastního algoritmu pro zpracování a vyhodnocení obrazu snímaného smart kamerou
- možnost ukládání několika vytvořených inspekcí do paměti kamery - jednoduchý přechod od jedné cílové úlohy k jiné
- možnost okamžitého vyzkoušení sestaveného algoritmu
- pohodlná práce s komunikačními protokoly

Nevýhody

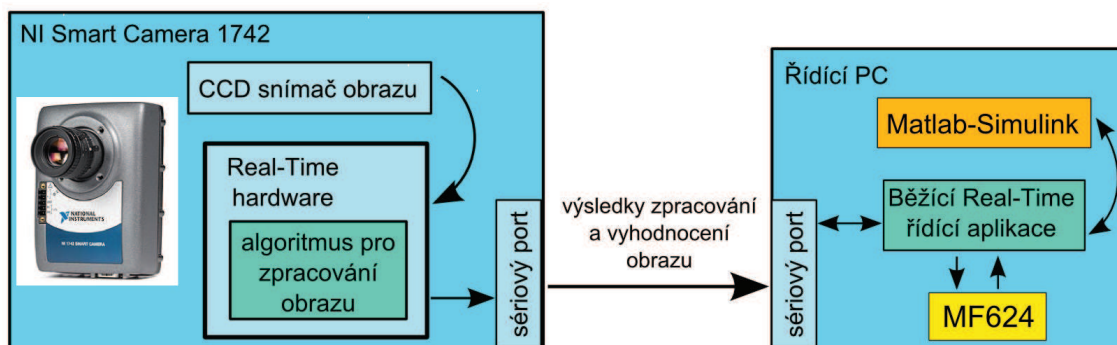
- omezenější počet funkcí
- nemožnost dokonalého přizpůsobení navrhovaného algoritmu

Jak je patrné z uvedeného přehledu výhod a nevýhod, bez nutnosti zdoluhavého programování je výhodnější použít prostředí Vision Builder AI. Pro práci v tomto prostředí je nutné pouze na začátku nainstalovat příslušný software do smart kamery. Poté je již celková práce se smart kamerou zaměřená pouze na návrh algoritmu pro zpracování a vyhodnocování obrazu. Pro prvotní seznámení se s algoritmy v oblasti zpracovávání a vyhodnocení obrazu poskytovaných společností National Instruments je proto dále využíváno prostředí Vision Builder AI.

6.1.3 Propojení kamery NI 1742 s řídicím PC

Komunikace mezi smart kamerou a řídicím počítačem manipulátoru může být zajištěna přes sériový port počítače (pomocí sériové komunikace), nebo s využitím ethernetové komunikace. Výhodnější je použití jednodušší sériové komunikace. Tato komunikace bude dále využita v praktických úlohách, kde bude využit navržený manipulátor společně s vision systémem. Popis použití RTWT toolboxu pro sériovou komunikaci je uveden v části 5.1.1.

Schéma zpracování obrazu s následným posíláním výsledků do řídicího PC je na obr. 6.1.



Obrázek 6.1: Datový tok mezi kamerou a řídicím PC.

6.1.4 Postup zpracování a vyhodnocení obrazu

Pro naprogramování hardwaru, který je k dispozici ve využívané kameře, je použito dříve zmíněné prostředí Vision Builder AI.

Návrh programu pro zpracování obrazu se skládá ze tří základních kroků:

1. **Vytvoření obrazové matice** (výstupní obraz z CCD snímače). Je potřeba nastavit vhodnou dobu expozice - čím delší doba expozice, tím více světla dopadne na záznamový CCD čip. S rostoucí dobou expozice se ovšem zvětšuje šum v obraze (vlivem temných proudů⁵) - výstupem je obraz v odstínech šedi s rozlišením 640x480 pixelů.
2. Následuje **vhodná úprava obrazu** - úprava jasu, kontrastu, základní odstranění šumu v obraze, kalibrace k určení reálných vzdáleností v obraze, atd....
3. Poté jsou využity **jednoduché i pokročilé metody zpracování obrazu**, jako je např. detekce cílových objektů, rozpoznání velikostí, tvarů. Knihovna v prostředí Vision Builder AI obsahuje algoritmy určené pro rozpoznání textu, nástroje pro měření reálných vzdáleností v obraze a spoustu dalších.

Po vyhodnocení snímaného obrazu je možné získaná data dále upravit (základní logické operace, vyhodnocení dílčích kroků zpracování obrazu, atd...). Pro odeslání výsledných dat je pak možné nakonfigurovat a použít vhodný komunikační protokol, který daná smart kamera umožňuje použít (RS232, Ethernet).

⁵temné proudy - jedná se o šum v obraze, který je způsoben vlivem teploty

7 Vytvoření ukázkových úloh

Tato kapitola je zaměřena na vytvoření ukázkových úloh. Tyto úlohy využívají vision system, který zpracuje a vyhodnotí snímaný obraz pracovního prostoru manipulátoru. Následně jsou výsledky (např. pozice cílového objektu) předány řídicímu počítači, na kterém běží Real-Time aplikace řídící samotný manipulátor.

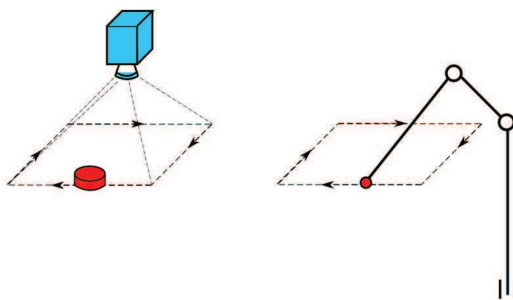
V závislosti na dané úloze jsou data z kamery využita pro řízení pohybu manipulátoru nebo pro monitorování samotného stavu manipulátoru (sledování pozice, atd...).

7.1 Online kopírování trajektorie předmětu pohybem manipulátoru

Jedním z mnoha využití použité smart kamery je úloha, kdy je potřeba sledovat cílový objekt a vyhodnocovat jeho pozici v souřadnicovém systému základny manipulátoru (osy y, z). Takto určená pozice je následně využita pro pohyb samotného manipulátoru. Ten se na základě určených pozic cílového předmětu (v osách x, y) snaží o vytvoření totožného pohybu koncovým efektem (ve stejné orientovaných osách x, y). Jedná se o jednoduché online kopírování pohybu, který je definován pohybem vybraného objektu.

Vhodným využitím takto navržené jednoduché úlohy by mohlo být například sledování výrobku pohybujícího se na dopravníkovém páse. Tímto způsobem je možné zajistit nulovou relativní rychlost mezi výrobkem a koncovým efektem manipulátoru. Takto je možné na sledovaném výrobku, během jeho cesty po dopravním páse, vykonávat nějakou technologickou operaci (např. vrtání otvoru, atd...).

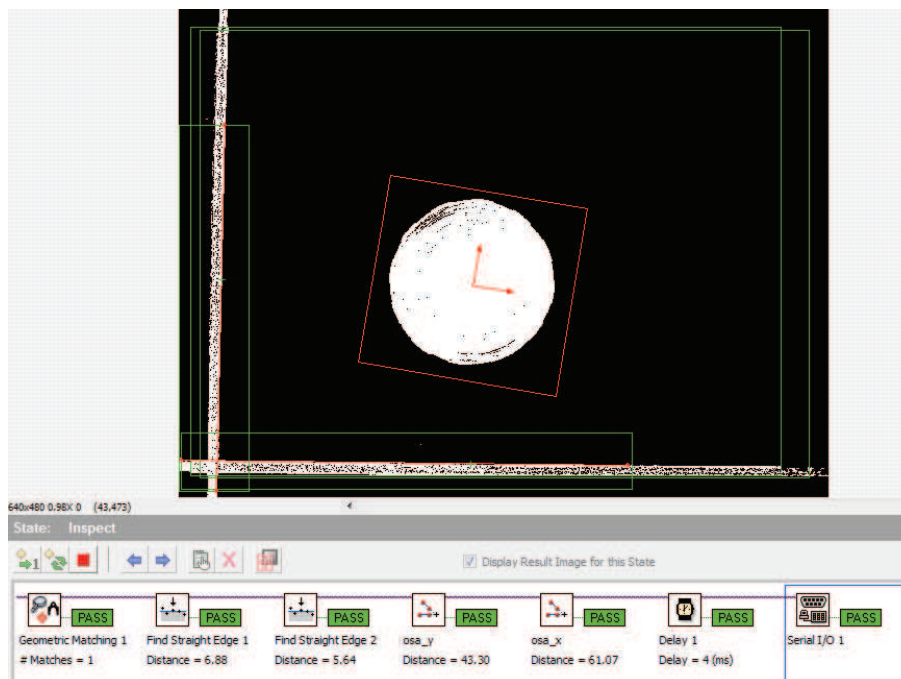
Jak je vidět z obr. 7.1, samotná úloha je koncipována tak, že část snímání polohy cílového objektu je realizována na samostatném pracovišti. Toto pracoviště je umístěno mimo pracovní prostor manipulátoru (kvůli jednoduššímu a především bezpečnému umístění kamery). Koncový efektor manipulátoru tak s minimálním zpožděním vykonává pohyb po stejné trajektorii jako vykonává sledovaný předmět na stanovišti s kamerou.



Obrázek 7.1: Prostor, kde je zaznamenávána trajektorie sledovaného předmětu (vlevo). Kopírování trajektorie koncovým bodem manipulátoru (vpravo).

7.1.1 Vytvoření aplikace pro zpracování obrazu

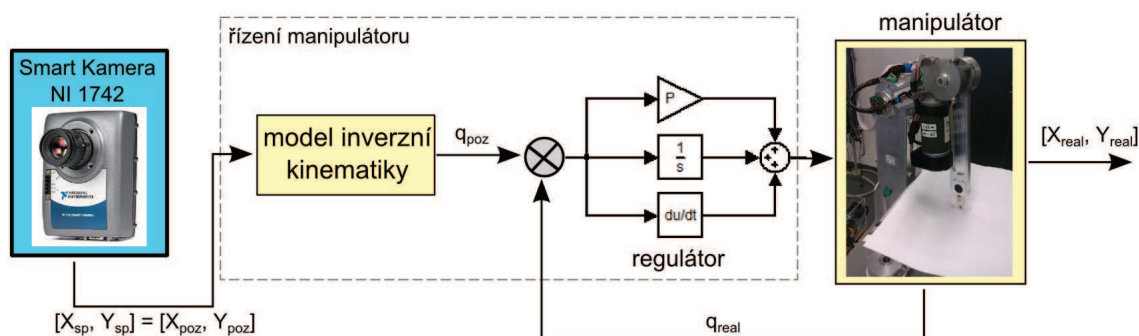
Jak bylo již dříve popsáno, aplikace pro zpracování a vyhodnocení bude realizována vytvořením inspekce v prostředí VBAI. Průběh zpracování a vyhodnocení snímaného obrazu se sledovaným předmětem, který je pro jednoduchost kruhového tvaru, je vidět z obr. 7.2.



Obrázek 7.2: Inspekce v prostředí VBAI pro určení polohy sledovaného předmětu.

7.1.2 Aktualizace polohy koncového bodu manipulátoru

Pozice sledovaného předmětu (x_{sp}, y_{sp}) je pak pomocí sériové linky (popsáno v části 6.1.3) předána Real-Time aplikaci, která řídí pohyb koncového bodu manipulátoru. Tyto hodnoty jsou ve formě aktualizovaných požadovaných pozic ($x_{poz} = x_{sp}$, $y_{poz} = y_{sp}$) předány inverznímu kinematickému modelu, který vypočítá příslušné natočení jednotlivých aktuátorů v kloubových souřadnicích. Výsledkem je přemístění koncového bodu manipulátoru na aktuální souřadnice v kartézském souřadném systému tak, že kopírují relativní polohu sledovaného předmětu.



Obrázek 7.3: Schéma propojení kamery a řídicího systému manipulátoru.

7.2 Snímání polohy koncového efektoru

Další úlohou je využití kamery ke snímání a kontrole polohy koncového efektoru manipulátoru. K dispozici byla v okamžiku návrhu této úlohy pouze jedna kamera, proto je poloha snímána pouze "2D" v ose y a ose z.

Využití této úlohy je např. pro redundantní kontrolu správné polohy koncového efektoru vůči požadované poloze. Snímání polohy kamerou je naprosto nezávislé na běhu řídicí aplikace. Proto může být využito pro kontrolu správné pozice koncového efektoru. V okamžiku, kdy se koncový efektor nenachází na pozici definované kinematickým modelem, vyhodnotí se tento stav jako chybový. Řídicí aplikace poté provede vhodný zásah jako je přerušení prováděné úlohy (je-li to možné) s následnou kalibrací jednotlivých natočení aktuátorů.

Úloha sledování pozice koncového efektoru manipulátoru byla především využita při korekcích kinematického modelu. Při korekcích kinematického modelu se podle výsledků z kamery postupně upravovaly parametry modelu tak, aby výsledná poloha v kartézských souřadnicích byla v souladu s nakalibrovanými výsledky (z kamery).

7.2.1 Vytvoření aplikace pro zpracování obrazu

Pro určení polohy koncového efektoru manipulátoru byla téměř na konci posledního ramene vytvořena značka. Jedná se o nejjednodušší značku, kterou lze vytvořit - kruhová černá značka. Jelikož se jedná o jednoduchý tvar, který má především výhodnou vlastnost invariance vůči natočení, není příliš náročné tuto značku v obraze najít. K nalezení je využita funkce dostupná v prostředí VBAI, která z předem nadefinované šablony (vycházející z tvaru značky) hledá ve snímaném obraze stejný tvar. Tímto způsobem je nalezena poloha koncového bodu manipulátoru v obraze.

K určení polohy koncového bodu manipulátoru, vzhledem ke kartézskému souřadnicovému systému vztahenému k základně manipulátoru, je nutné v obraze definovat osu y a osu z .

Osa z se v obraze definuje na základě vhodné vertikální hrany konstrukce. Osa y je následně definovaná podle černé značky orientované rovnoběžně se základnou manipulátoru.

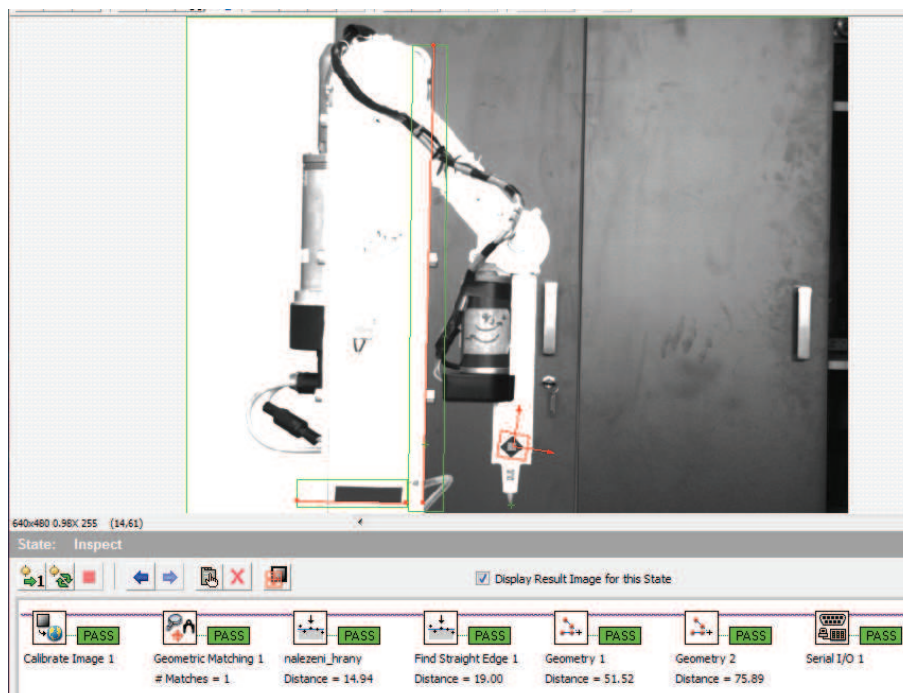
V okamžiku, kdy je známá poloha koncového bodu manipulátoru společně s polohou os y, z , je možné určit pozici koncového bodu manipulátoru.

Pro přesné určení pozice je vhodné, když je kamera umístěna tak, aby osa¹ kamery byla kolmá k ploše určené osami y a z . V prostředí VBAI jsou k dispozici nástroje pro transformaci souřadnicového systému obrazu. Tyto nástroje dokáží přetransformovat obraz, který není orientovaný kolmo k objektivu kamery tak, aby se pro další zpracování jevil právě jako kdyby byl orientovaný kolmo k objektivu kamery. Použití těchto transformací vede ke zbytečnému zpomalování aplikace běžící v použité kameře, proto byla kamera umístěna právě kolmo ke snímané scéně s manipulátorem.

Před samotným zpracováním obrazu je nutné pro měření reálných rozměrů v obraze určit velikost pixelu, která reprezentuje vzdálenost v reálném světě. Tato kalibrace se provede v prostředí VBAI jednoduchým výběrem dvou bodů v obraze, u kterých je známá jejich reálná vzdálenost.

Samotný průběh zpracování s výsledným obrazem lze vidět z obr. 7.4.

¹osa kamery - pomyslná osa vedená vřlcovřm řřem objektivu kamery



Obrázek 7.4: Inspekce v prostředí VBAI pro určení pozice koncového bodu manipulátoru v kartézském souřadnicovém systému.

7.2.2 Vyhodnocení pozice koncového efektoru manipulátoru

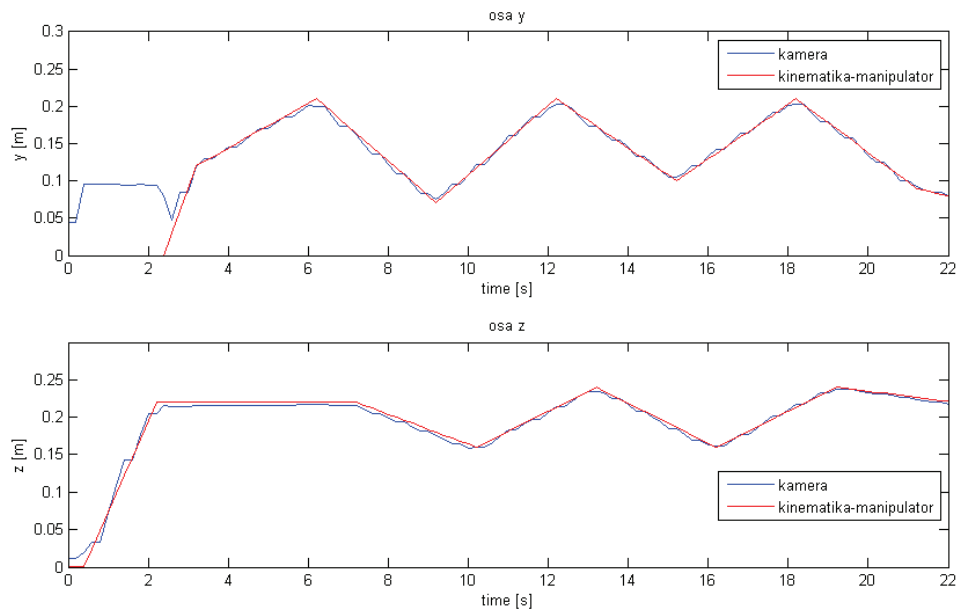
Po vyhodnocení snímaného obrazu a vypočítání pozice koncového bodu manipulátoru jsou výsledná data (souřadnice y, z) předána Real-Time aplikaci pomocí sériové linky. Tato aplikace poskytne data souběžně běžícímu modelu v Simulinku, kde jsou souřadnice koncového bodu manipulátoru porovnány s kinematickým modelem.

Pro účely snímání polohy koncového bodu manipulátoru byla vytvořena sekvence pohybů v ose y a ose z . Před spuštěním této sekvence je spuštěna inicializace pohonů (která proběhne vždy při spuštění manipulátoru automaticky - viz. část 5.2.1).

Výsledné průběhy pozice koncového efektoru, v osách y, z kartézského souřadnicového systému definovaného k základně manipulátoru, jsou vidět na obr. 7.5

Z průběhů pozice y a z lze vidět, že hodnoty získané z kinematického modelu a zpracováním obrazu kamerou se shodují.

Nepřesnosti mohou být způsobeny špatným umístěním kamery vůči manipulátoru (není dodržena kolmost osy kamery k ploše y, z souřadnicového systému manipulátoru). Dalším zdrojem nepřesností a problémů při zpracování snímaného



Obrázek 7.5: Průběh pozice koncového efektoru v osách y, z získaný z kinematického modelu a použitého vision systému.

obrazu je intenzita osvětlení scény s manipulátorem. Při tvorbě aplikace běžící v kameře, která zpracovává snímání obraz, je počítáno s definovaným osvětlením, které bylo k dispozici při nastavování algoritmů zpracovávajících obraz. Při snímání scény s manipulátorem musí být tedy dodrženy přibližně stejné světelné podmínky na které byla aplikace navržena. Při dodržení dostatečně vhodných světelných podmínek pracuje navržený algoritmus velice dobře (jak je vidět z předchozího průběhu).

8 Závěr

Cílem diplomové práce byl návrh výukové platformy manipulátoru a její spolehlivý a bezpečný provoz.

V první části byl nastíněn postup návrhu takového manipulátoru založený na modelech. K vytvoření kinematických a dynamických modelů byl využit nástroj Simmechanics, který je součástí prostředí Matlab-Simulink. Simmechanics, použitý společně s některými funkcemi z Robotic Toolboxu, byl velice vhodným nástrojem pro realizaci různých simulací manipulátoru, které byly podkladem pro návrh konstrukce a elektroniky výukové platformy.

Další část se zabývala návrhem a realizací elektroniky. Jednalo se především o tu, která přispěla k bezpečnému a spolehlivému provozu manipulátoru. Velmi užitečnou se ukázala elektronika, která zpracovávala informace o stavu koncových spínačů a aktuální požadované poloze manipulátoru. V prvotních fázích vývoje řídicích algoritmů přispěla k jednoduššímu a především nedestruktivnímu provozu manipulátoru. Následně byl vytvořen kompaktní modul obsahující veškerou elektroniku, ke kterému se velmi jednoduše připojily pohony a všechny použité snímače. Návrh počítal i s možností dalšího rozšíření senzoriky.

V části zabývající se bezpečným a spolehlivým provozem výukové platformy manipulátoru byla nemalá část práce věnovaná snímání polohy a převodu polohy určené relativními enkodéry na absolutní polohu vůči základně. Pro přesné řízení manipulátoru v kartézském souřadnicovém systému, vztaženému k základně manipulátoru, je takto určená absolutní poloha (natočení) základním prvkem úspěchu. Následně byl využit snímač zrychlení jako redundantní snímač natočení. Ze srovnání natočení určeného tímto snímačem zrychlení a enkodéry je patrné, že minimálně pro kontrolní určení polohy jednotlivých částí manipulátoru jsou akcelerometry dobře a jednoduše použitelné.

Jedna z posledních částí práce byla věnována použití navrženého manipulátoru, kde bylo využíváno dat z kamerového systému snímajícího scénu s manipulátorem. Kamerový systém byl nejprve využit pro úlohu kopírování trajektorie sledovaného předmětu. Pohyb tohoto předmětu byl přenášén (online) na pohyb koncového efektoru manipulátoru. S dostupnými nástroji pro zpracování obrazu od National Instruments bylo dosaženo uspojitých výsledků relativně rychle a jednoduše. Druhou vytvořenou úlohou bylo sledování pozice koncového efektoru v kartézském souřadnicovém systému manipulátoru. K dispozici byla pouze jedna kamera, jedná se proto o určování pozice v osách y a z . Základem bylo ve snímaném obraze vhodně určit osy tohoto souřadnicového systému a následně určit samotnou polohu koncového efektoru (za pomoci vhodně umístěné vizuální značky). Takto získaná poloha je určená zcela nezávisle na snímačích natočení nebo na použitém kinematickém

modelu. Z uvedených průběhů (obr. 7.5) je patrné, že bylo dosaženo dobré shody polohy vyhodnocené z obrazu a polohy dané kinematickým modelem.

Výsledkem této práce je výukový model, který má značný potenciál co se týče dynamiky pohybů. Bezpečný a splehlivý provoz je zajištěn jak na hardwarové úrovni (ochranná elektronika), tak i na softwarové, prostřednictvím cíleně vytvořené knihovny. V této knihovně jsou zakomponované jednoduché bezpečnostní prvky (omezení momentů, rozsahu pohybů, ...). Hlavním cílem takto vytvořeného softwaru je především zjednodušit návrh pokročilejších algoritmů řízení.

Při návrhu a realizaci této výukové platformy byly použity nejdostupnější použitelné komponenty jako jsou běžné inkrementální enkodéry. Možností dalšího rozšíření je např. doplnění soustavy o absolutní enkodéry (nebo jiné absolutní snímače), které by přispěly k jednoduššímu použití manipulátoru.

9 Literatura a odkazy

- [1] VEJLUPEK, J., KREJSA, J., RIPEL, T.: *Platforma pro výuku modelování, identifikace a řízení dynamických soustav*, [Závěrečná zpráva projektu FRVŠ G1 1984/2012] Brno: VUT, Fakulta strojního inženýrství, 73 s., 2013
- [2] ŠURANSKÝ, M.: *Modelování, identifikace a řízení robotického manipulátoru.*, [Diplomová práce.] Brno: VUT, Fakulta strojního inženýrství, 80 s., 2013
- [3] ROBOTIC TOOLBOXU:, http://petercorke.com/Robotics_Toolbox.html, [online], 2013-04
- [4] DATASHEET K POHONU GR63X55 :, <http://www.dunkermotoren.com/default.asp?id=9&mid=12&lang=2>, [online], 2013-01
- [5] DATASHEET K POHONU WLD4348 :, <http://www.transmotec.cz/dc-motory-prevodovka-snekova/serie-wld4383.html>, [online], 2013-01
- [6] KARTA MF624:, <http://www.humusoft.cz/produkty/datacq/mf624/>, [online], 2013-01
- [7] VEJLUPEK, J.: *Vývoj elektroniky pro řízení trakce experimentálního vozidla.*, [Diplomová práce.] Brno: VUT, Fakulta strojního inženýrství, 73 s., 2010
- [8] NI 1742 SMART CAMERA :, <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/204079>, [online], 2013-04
- [9] NI 17XX SMART CAMERA USER MANUAL: *Austin*, 2008,
- [10] NATIONAL INSTRUMENTS: *NI Vision Builder for Automated Inspection Tutorial*, Austin, 2012
- [11] GREPL, R.: *Kinematika a dynamika mechatronických systémů*, Vysoké učení technické v Brně, 2007
- [12] VALÁŠEK, M.: *Mechatronika*, Praha: ČVUT, 2007
- [13] DATASHEET K AKCELEROMETRU ADXL325:, <http://www.analog.com/en/mems-sensors/mems-inertial-sensors/adxl325/products/product.html>, [online], 2013-03
- [14] WHAT IS A REAL-TIME OPERATING SYSTEM:, <http://www.ni.com/white-paper/3938/en>, [online], 2013-02

-
- [15] GREPL, R.: *Modelování mechatronických systémů v Matlabu/SimMechanics*, BEN, 2007
- [16] NOSKIEVIČ, P.: *Modelování a identifikace systémů*, Ostrava: Montanex, 1999
- [17] CORKE, P.: *Robotics, Vision and Control*, Springer Berlin Heidelberg, 2011
- [18] HORÁČEK, P.: *Systémy a modely*, Praha: ČVUT, 1999

10 Seznam symbolů a zkratek

PID - proporcionální-integrační-derivační (regulátor)
RRR - rotace-rotace-rotace (vazby manipulátoru)
 r_1, r_2, r_3 - ramena manipulátoru
 P_1, P_2, P_3 - označení pohonů
 $Enc_{P1}, Enc_{P2}, Enc_{P3}$ - označení enkodérů
 L_{r1}, L_{r2}, L_{r3} - délky jednotlivých ramen
 m_{r1}, m_{r2}, m_{r3} - hmotnosti jednotlivých ramen
 m_{P1}, m_{P2}, m_{P3} - hmotnosti pohonů
jtraj - funkce obsažená v Robotic Toolboxu
LEM - snímač proudu
I - matice setrvačnosti
PWM - pulzně šířková modulace
DIR - "direction"- směr otáčení
DIS - "disable"-odpojí tranzistory
DIAG - diagnostický signál z výkonové elektroniky
DPS - deska plošných spojů
S1, S2 - označení koncových spínačů
LED - Light-Emitting Diode
RTWT - Real-Time Windows Target
A/D - Analogovo/Digitální převodník
RS232 - sériové komunikační rozhraní
INDEX - výstupní signál z indexovacího spínače
 AD_{acc} - výstup z AD převodníku, na který je připojen akcelerometr
 α - natočení pohonu
CCD - Charge-Coupled Device - snímač obrazu
fps - počet snímků za sekundu
NI - National Instruments
VBAI - Vision Builder AI
 x_{sp}, y_{sp} - souřadnice sledovaného předmětu
 x_{poz}, y_{poz} - požadované souřadnice koncového efektoru

11 Přílohy

Matlab-Simulink

1. **Simulace pohybu** - modely a m-file použité v části 3.3.
2. **Real Time řízení** - základní Real-Time řídicí struktura v Simulinku.
3. **Aplikace** - Simulinkovské modely pro spuštění ukázkových úloh uvedených v 7.1 a 7.2.
4. **Knihovna** - obsah knihovny popisované v části 5.3.

Eagle

1. **Ochranná elektronika** - schéma a DPS elektroniky popsané v části 4.3.
2. **Konektorová deska** - schema a DPS konektorové desky popsané v části 4.2
3. **ISL optické oddělení** - schema a DPS vrchní desky popsané v části 4.2

Ostatní

1. **MF624 pinout** - zapojení vstupů/výstupů karty MF624.